

การเปลี่ยนสีของเพทหายที่หุงไม่ขึ้นสีโดยการฉายรังสีแกมมา



นายวชิรบุญ ตรงศีลสัตย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COLOR ALTERATION OF FAILED HEAT TREATED ZIRCON BY GAMMA IRRADIATION



Mr. Washiraboon Trongsilat

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปลี่ยนสีของเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีโดยการฉายรังสีแกมมา

โดย

นายวชิรบุญ ตรงศิลป์

สาขาวิชา

นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี

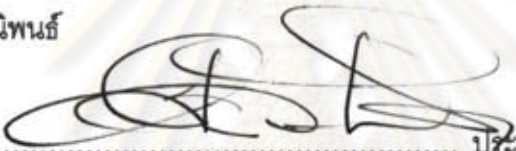
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

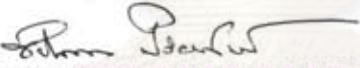
รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สัญชัย นิลสุวรรณเมษิต)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ศิริวิวัฒนา บัญชรเทวกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

วิทยานิพนธ์ ตรีศัลลิต์ : การเปลี่ยนสีของเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีโดยการฉายรังสีแกมมา
(COLOR ALTERATION OF FAILED HEAT TREATED ZIRCON BY GAMMA
IRRADIATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ชยากริต ศิริอุปถัมภ์, 118 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนสีของเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีโดยวิธีการฉายรังสีแกมมา โดยให้ความร้อนแก่เพทายที่ได้มาจากเหมืองพลอยในประเทศกัมพูชาในบรรยากาศการให้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส แล้วเลือกเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีสำหรับการทดลองครั้งนี้ โดยใช้วิธีฉายรังสีแกมมาในปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 200-1,000 kGy เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงสีที่อาจเกิดขึ้น

จากการวิจัย พบว่าสีของเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีทั้งหมดสามารถเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้มที่ปริมาณรังสีมากกว่า 600 kGy ระดับของเฉดสี ความทึบแสง และความบริสุทธิ์ของสี ประเมินโดยมาตรฐานของสถาบันอัญมณีแห่งอเมริกา (GIA) ใช้วิธีการวาวของรังสีเอกซ์เพื่อวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยและใช้วิธีการอาบรังสีนิวตรอน ในการวิเคราะห์ธาตุรองในเพทาย ซึ่งพบว่ามีธาตุหลักคือเซอร์โคเนียม ประมาณ 30% ในเพทายที่หุงขึ้นสีทั้งหมดมีธาตุเซอร์โคเนียมในปริมาณประมาณ 50% ในเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีทั้งหมด และยังพบธาตุปริมาณน้อยคือ ฮาร์ฟเนียมในเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีว่ามีปริมาณน้อยกว่าในเพทายที่หุงขึ้นสี ทั้งยังพบธาตุปริมาณน้อยเช่น สแกนเดียม และ ดิสโพรเซียม ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันในเพทายที่หุงขึ้นสีและเพทายที่หุงไม่ขึ้นสี โดยสันนิษฐานว่าธาตุปริมาณน้อยเช่น สแกนเดียม และ ดิสโพรเซียม นั้นไม่มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสีของเพทายเมื่อถูกฉายรังสีแกมมาและสันนิษฐานว่าการเปลี่ยนสีของเพทายโดยวิธีฉายรังสีแกมมา อาจมาจากปรากฏการณ์การเกิด Color center

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
ปีการศึกษา 2551.....

ลายมือชื่อนิสิต *[Signature]*
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก *[Signature]*
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

4870445021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORDS : ZIRCON, HEAT TREATED, GAMMA IRRADIATION

WASHIRABOON TRONGSILSAT: COLOR ALTERATION OF FAILED HEAT TREATED ZIRCON BY GAMMA IRRADIATION. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHAYAGRIT SIRI-UPATHUM, 118 pp.

This research was a study of color alteration of failed heat treated zircon by gamma irradiation. Using heat treatment in the oxidation atmosphere at the temperature of 1,000 C with yellow-red zircon from a gemstone mine in Cambodia, failed heat treated zircon was selected for further experiment. The zircon was gamma irradiated at various doses of 200-1,000 kGy in ambient temperature to observe change in color that might occur.

It was found that the color of all failed heat treated zircon could be changed to dark red at a dose of above 600 kGy. The degree of hue; tone and saturation were evaluated using Gemological Institutes of America (GIA) standard. Using X-ray fluorescence spectroscopy to analyze major elements and neutron activation analysis to analyze trace element in Zircon, it revealed that the Zr content was about 30% in all zircon with successful heat treated whereas zirconium content in the order of 50% was found in all failed heat treated zircon. It was also found that the failed heat treated zircon had the sister element Hf of lower content than that of the successful heat treated zircon. Trace of Sc and Dy were found in nearly same content in both types of zircon and their presence in zircon might not relate with color alteration by irradiation. It was speculated that the color alteration of zircon by gamma irradiation might come from the production of light color center.

Department: Nuclear Technology Student's signature.....
 Field of study: Nuclear Technology Advisor's signature.....
 Academic year: 2008.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์วิชิต เจริญสิงขร โรงเรียนขลุงรัชดาภิเษก อ.ขลุง จ.จันทบุรี ที่กรุณาให้ใช้เครื่องหุงพลอยและมอบตัวอย่างเพทายจากแหล่งต่างๆรวมทั้งความช่วยเหลือด้านต่างๆมากมาย

ขอขอบคุณ คุณอารีรัตน์ คอนดวงแก้ว คุณนงคินุช แจ้งสว่าง และคุณรัชชัย ฟุ้งกลิ่น แห่งสถาบันวิจัยนิวเคลียร์แห่งชาติ (มหาชน) ที่กรุณาให้คำแนะนำการวัดปริมาณรังสี การใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ การหาปริมาณธาตุด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องฉายรังสี Gamma cell 220 excell, เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer และ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ซึ่งให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องต่างๆมากมาย

ขอขอบคุณ คุณอาทร สกุลวรกิจ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เป็นต้นแบบโครงร่างวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กาญจนา ชูครุวงศ์ จาก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับทฤษฎีการประเมินคุณภาพอัญมณี ซึ่งเป็นเนื้อหาหลักในวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านจากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคุณธนง ลีลาวัฒน์สุข จากสถาบันวิจัยอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (มหาชน) ที่ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยและขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนนิสิตภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ท้ายที่สุดผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ มารดาบิดา และผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่าน ซึ่งคอยสนับสนุนในทุกๆด้านและเป็นกำลังใจที่สำคัญแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เพทาย.....	3
2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเพทาย.....	6
2.3 รังสีแกมมา (Gamma - rays).....	7
2.4 การเปลี่ยนสีอัญมณีโดยการฉายรังสี	8
2.5 การนำพลอยมาฉายด้วยรังสีแกมมา.....	11
2.6 กระบวนการในการเปลี่ยนแปลงสีของพลอย.....	12
2.7 สี.....	14
2.8 แสงสี.....	15
2.9 การประเมินสีอัญมณี.....	15
2.10 การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	22
2.11 การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน.....	30
2.12 องค์ประกอบธาตุภายในของเพทายที่ส่งผลต่อสีเพทาย.....	34
2.13 การศึกษาเบื้องต้นของการเปลี่ยนสีเพทายด้วยการเผา.....	34
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 การให้ความร้อนกับเพทายและคัดเลือกเพทายที่ให้ความร้อนแล้ว	

ไม่เกิดการเปลี่ยนสี.....	40
3.2 การฉายรังสีแกมมาให้กับเพทายที่ให้ความร้อนแล้วไม่เปลี่ยนสี.....	40
3.3 การประเมินสีของเพทายหลังจากผ่านการฉายรังสีแกมมา.....	41
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างเพทายด้วยด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	42
3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	47
3.6 การฉายแสงเพทายที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา.....	47
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	48
4.1 ผลการประเมินค่าสีของเพทายที่ทดสอบที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา.....	49
4.2 ผลการประเมินค่าสีของเพทายที่ทดสอบโดยผ่านการฉายรังสีแกมมาเมื่อ ฉายแสงจาก Spot Light.....	52
4.3 การหาปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	68
4.4 ปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์นิวตรอนแอคติเวชัน.....	74
4.5 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพทายด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	81
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	101
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	102
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	105
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	118

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงผลการหาปริมาณธาตุจาก Agilent ICP-MS.....	36
ตารางที่ 4.1 สมบัติค่าสี ได้แก่ สี (Hue) โทนสว่าง (Tone) และความบริสุทธิ์ของสี (Saturate)....	50
ตารางที่ 4.2 สมบัติค่าสี ได้แก่ สี (Hue) โทนสว่าง (Tone) และความบริสุทธิ์ของสี (Saturate) ของเพทายที่ฉายแกมมาแล้วนำมาฉายแสงด้วย Spot Light.....	52
ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบการจางสีของเพทายที่ฉายรังสีแกมมาแล้วหลังการฉายแสงจากหลอดไฟโดยเปรียบเทียบกับเพทายที่ฉายรังสีแกมมาแล้วแต่ไม่ได้ฉายแสงจากหลอดไฟ.....	53
ตารางที่ 4.4 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสี (สีไม่เปลี่ยน) โดยเทียบสีจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA.....	54
ตารางที่ 4.5 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนขึ้นสีโดยเทียบสีจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA.....	55
ตารางที่ 4.6 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วยังไม่ผ่านการหุงด้วยความร้อนโดยเทียบสีจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA.....	56
ตารางที่ 4.7 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 200 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA.....	57
ตารางที่ 4.8 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 400 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA.....	58
ตารางที่ 4.9 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 600 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA.....	59
ตารางที่ 4.10 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 800 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA.....	60
ตารางที่ 4.11 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 1,000 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน.....	61
ตารางที่ 4.12 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 200 kGyและผ่านการฉายแสงจากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี.....	62
ตารางที่ 4.13 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 400 kGy และผ่านการฉายแสงจากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี.....	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ญ

ตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.14 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 600 kGy และผ่านการฉายแสง จากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี.....	64
ตารางที่ 4.15 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 800 kGy และผ่านการฉายแสง จากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี.....	65
ตารางที่ 4.16 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 1,000 kGy และผ่านการฉายแสง จากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี.....	66
ตารางที่ 4.17 สีของตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 600 kGy ก่อนและหลัง การฉายแสงจากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อเปรียบเทียบการจางสี.....	67
ตารางที่ 4.18 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในเพทายเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ด้วยวิธีเอกซเรย์.....	72
ตารางที่ 4.19 แสดงมวลของเพทายตัวอย่างและสารอ้างอิงมาตรฐานทั้งสองชนิด.....	73
ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A1.....	80
ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A2.....	81
ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A3.....	81
ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B1.....	82
ตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B2.....	82
ตารางที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B3.....	83
ตารางที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A4.....	84
ตารางที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A5.....	85
ตารางที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A6.....	86
ตารางที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B4.....	87
ตารางที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B5.....	88
ตารางที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B6.....	89
ตารางที่ 4.32 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุเซอร์โคเนียมในตัวอย่างเพทายหุงขึ้นสีจากการ วิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	90
ตารางที่ 4.33 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุเซอร์โคเนียมในตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีจากการ วิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	91

ตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.34 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุซัลฟเนียมในตัวอย่างเพทายหุงขึ้นสีจากการ วิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	92
ตารางที่ 4.35 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุเซอร์โคเนียมในตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีจากการ วิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	93
ตารางที่ 4.36 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุดีสโพรเซียมในตัวอย่างเพทายหุงขึ้นสีจากการ วิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	94
ตารางที่ 4.37 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุดีสโพรเซียมในตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีจากการ วิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	95
ตารางที่ 4.38 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุสตรอนเซียมในตัวอย่างเพทายหุงขึ้นสีจากการ วิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	96
ตารางที่ 4.39 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุสตรอนเซียมในตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีจากการ วิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน.....	97
ตารางที่ 4.40 แสดงผลปริมาณธาตุที่พบเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของเพทาย.....	98

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 เพทายใส.....	4
รูปที่ 2.2 เพทายสีฟ้า.....	4
รูปที่ 2.3 เพทายสีเหลือง.....	4
รูปที่ 2.4 เพทายสีแดง.....	5
รูปที่ 2.5 เพทายสีชนิดต่างๆ.....	5
รูปที่ 2.6 photomicrograph ของ Zircon ที่ขยายให้เห็นโครงสร้างภายใน	6
รูปที่ 2.7 ภาพการเกิดแกมมาจาก โคบอลต์-60.....	7
รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของแสง ที่ตาเรามองเห็น ประกอบด้วยแถบสี 7 สี	8
รูปที่ 2.9 ภาพ Beryl แต่ละสี เกิดจากแร่ธาตุที่เจืออยู่ แตกต่างกัน	9
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีก่อนผ่านการฉายรังสีแกมมา.....	11
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีผ่านการฉายรังสีแกมมา 400 kGy และอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....	11
รูปที่ 2.12 ภาพแสดงกระบวนการเกิดคัลเลอร์เซนเตอร์ (Color Center) อัญมณี.....	13
รูปที่ 2.13 แสดงสีตามความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร	16
รูปที่ 2.14 แสดงแถบสี (Hue) ของ grading color ในระบบเกรดสี GIA	18
รูปที่ 2.15 แสดงแถบความสว่าง (Tone) ของ grading color ในระบบเกรดสี GIA.....	18
รูปที่ 2.16 แถบความบริสุทธิ์ของสี (Saturation) ของgrading color ในระบบเกรดสีGIA.....	19
รูปที่ 2.17 หลอดไฟประเภท fluorescent สำหรับประเมินสีอัญมณีชนิดของแสงไฟ.....	20
รูปที่ 2.18 ตารางgrading chart สรุปล่วงสีอัญมณี	21
รูปที่ 2.19 แผ่นเทียบและประเมินสี ที่ใช้ในการประเมินสีในระบบของ GIA.....	42
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างของแผ่นเทียบและประเมินสี ที่ใช้ในการประเมินสีในระบบของ GIA	22
รูปที่ 2.21 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น.....	25
รูปที่ 2.22 รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร	26
รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์ของรังสีเอกซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน.....	27
รูปที่ 2.24 แอ็บซอร์บชันเอดจ์ของอิเล็กตรอนในชั้น K, L, M	28
รูปที่ 2.25 แอ็บซอร์บชันเอดจ์ของคาร์บอน ไนโตรเจนและออกซิเจน	28
รูปที่ 2.26 แอ็บซอร์บชันเอดจ์ (absorption edge)	29

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.27 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์	30
รูปที่ 2.28 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์	30
รูปที่ 2.29 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จำเพาะของธาตุ	31
รูปที่ 2.30 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จำเพาะของธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียม	31
รูปที่ 2.31 ปฏิกิริยา neutron capture gamma ray	32
รูปที่ 2.32 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างซีลิกอนออกไซด์อานิวตรอน	33
รูปที่ 2.33 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างหินที่มีแร่ทองคำอานิวตรอน	33
รูปที่ 2.34 Portion of the Zircon unit cell showing interconnection of SiO_4 tetrahedrons and ZrO_6 dodecahedron along the 4 axis	37
รูปที่ 3.1 เครื่องฉายรังสีแกมมา Co-60 Gammacell 220 excel สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ	42
รูปที่ 3.2 ชุดวิเคราะห์เครื่องวัดรังสีแกมมา	42
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเพทายตัวอย่าง A-1	68
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเพทายตัวอย่าง A-2	69
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเพทายตัวอย่าง A-3	69
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเพทายตัวอย่าง B-1	70
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเพทายตัวอย่าง B-2	70
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเพทายตัวอย่าง B-3	71
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ A1	74
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ A2	74
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ A3	75
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ A4	75
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ A5	76
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ A6	76
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ B1	77
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ B2	77
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ B3	78
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ B4	78

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ B5	79
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่างที่ B6.....	79



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อัญมณีเป็นสิ่งที่ธรรมชาติสร้างขึ้น มีความสวยงามและมีลักษณะเฉพาะที่เป็นสิ่งดึงดูดความสนใจของผู้คน อย่างไรก็ตามสิ่งที่ธรรมชาติสร้างขึ้นไม่ได้มีความสมบูรณ์แบบเสมอไป เนื้อของอัญมณีโดยธรรมชาติ จะมีสีขุ่นไม่สดใสหรืออาจมีสีเข้มแต่สีกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทำให้ได้ในราคาที่ต่ำเมื่อนำออกจำหน่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำมาผ่านกรรมวิธีการปรับปรุงพัฒนาคุณภาพหรือทำให้มีความสวยงามเสียก่อน เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและสามารถนำไปจำหน่ายได้ในราคาที่สูงขึ้นกว่าเดิม ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้มนุษย์คิดค้นวิธีการที่ทำให้อัญมณีดูดีสวยงามหรือคงทนมากขึ้น การปรับปรุงพัฒนาคุณภาพสามารถทำได้ด้วยเทคนิควิธีต่างๆ เช่น การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน การเคลือบสี การย้อมสี และการฉายรังสี เป็นต้น

ปัจจุบันเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีด้วยวิธีการต่างๆ ข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถปรับโครงสร้างและสีพลอยเพื่อเพิ่มมูลค่าและราคา แต่การนำกรรมวิธีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้มักเกิดจากการลองผิดลองถูกและเป็นความลับของผู้ประกอบการแต่ละรายที่สืบทอดกันมาโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนหรือ การหุงพลอยและการฉายรังสีพลอย ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพโดยมีแนวคิดมาจากการเกิดและเปลี่ยนแปลงสภาพของอัญมณีด้วยความร้อนและรังสี การวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการเปลี่ยนสีของเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีมาทำกายฉายรังสีแกมมา เพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณธาตุต่างๆในเพทาย กับระดับการเปลี่ยนสีของเพทาย เพื่อเป็นแนวทางที่จะพัฒนาให้เกิดมูลค่าเพิ่มกับเพทาย โดยใช้ปริมาณธาตุต่างๆในเพทายที่หาได้จาก อยู่ในตลาดซื้อขายพลอยเพื่อบอกถึงความสัมพันธ์ของเปลี่ยนแปลงระดับสีของเพทาย เนื่องจากการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีต่างๆ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีโดยรังสีแกมมาของพลอยเพทายที่เกิดขึ้นเมื่อไม่เปลี่ยนสีโดย
หุงด้วยความร้อน

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาองค์ประกอบเชิงคุณภาพของเพทายที่หุงไม่ขึ้นสี
2. ศึกษาการเปลี่ยนสีของเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีเมื่อนำไปฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 200-1000 kGy แล้วนำไปหุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน
3. วิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบเชิงปริมาณของเพทายที่ทำการทดลองโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์และ/หรือโดยนิวตรอนแอคติเวชัน
4. หาความสัมพันธ์ (ถ้ามี) ของปริมาณธาตุและการเปลี่ยนแปลงสีของเพทายจากการใช้รังสีและความร้อน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาจะมีประโยชน์กับบุคลากรผู้ศึกษาและวิจัยเพทายและประชาชนทั่วไปที่สนใจการพัฒนาเพทายเพื่อเพิ่มมูลค่า
2. ผลที่ได้จากการศึกษาและวิเคราะห์จะช่วยแก้ปัญหาของเพทายที่หุงไม่ขึ้นสี

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎี และ บทความที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสีของพลอยเพทาย
2. ศึกษาชนิดธาตุองค์ประกอบของพลอยเพทาย นำไปหุงด้วยความร้อนแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี
3. นำพลอยจากชนิดที่ไม่สามารถนำไปหุงแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงได้มาทำการฉายรังสีแกมมา
4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของเพทายจากข้อ 3 ซึ่งถูกนำไปหุง
5. สรุปผลวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

2.1 ทฤษฎี

เพทาย (<http://patchra.net/minerals/MinDesc/zircon.php>, 2550)

เพทายเป็นแร่ที่มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นพวกเซอร์โคเนียม ซิลิเกต ($ZrSiO_4$) เมื่อสมัยอดีตเป็นอัญมณีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในเมืองไทย ถึงกับเรียกว่า เพชรไทย “เพทาย”

เพทายที่พบตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีสีออกไปทางน้ำตาล พบมากทางจังหวัดศรีสะเกษ จันทบุรี และตราด โดยเกิดร่วมกับพลอยตระกูลทับทิมและแซปไฟร์ก่อนที่จะนำมาเจียรไน มักนิยมนำไปเผาเสียก่อน เพื่อให้เกิดความใส ด้วยเหตุที่เพทายมีค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index) และ ค่ากระจายแสง (Dispersion) ใกล้เคียงเพชรมาก เมื่อนำมาเจียรไนแล้วจึงแลดูสวยงามคล้ายเพชร นอกจากการเผาเพทายให้ได้สีขาวใสบริสุทธิ์แล้วยังสามารถเผาให้ได้เป็นสีเหลือง เพทายบางเม็ดจากประเทศกัมพูชาเผาแล้วให้สีฟ้า กรรมวิธีตลอดจนตัวยาที่ใช้ในการเผาเพื่อให้ใสและให้เกิดความคงทนของสียังปกปิดเป็นความลับกันอยู่

2.1.1 ชนิดและลักษณะของเพทาย

เพทายที่มีความใสดูคล้ายกับเพชรมาก เมื่อเพทายใสได้รับการเจียรไนด้วยเหลี่ยมเพชร จะทำให้ดูงดงามคล้ายกับเพชร จนได้รับการเรียกขานว่า เพชรไทย นับแต่โบราณมาจนกระทั่งทุกวันนี้ นอกจากใสแล้ว เพทายสีฟ้า เพทายสีเหลือง และสีอื่น ๆ ต่างก็ได้รับความนิยมมากเช่นกัน ทั้งนี้ก็เพราะประกายที่ใกล้เคียงกับเพชรนั่นเอง มีรายละเอียดย่อต่อไปนี้

2.1.1.1 เพทายใส ถ้าจะให้ดูสวยงามใกล้เคียงกับเพชรมากที่สุด ควรต้องเลือกเฉพาะเพทายบริสุทธิ์ ไม่ออกสีเนื้อหรืออมน้ำตาล และได้รับการเจียรไนแบบเหลี่ยมเพชรด้วยเหลี่ยมเม็ดเล็ก ๆ



รูปที่ 2.1 เพทายใส

2.1.1.2 เพทายสีฟ้า เป็นเพทายสีที่ได้รับความนิยมมากเอกลักษณ์ของเพทายสีฟ้า อยู่ที่สีฟ้าที่เหมือนสีฟ้าใส และสีฟ้าของน้ำทะเลลึก (เป็นสีฟ้าอมเขียว) ยิ่งฟ้าเข้มสดเท่าไรก็ยิ่งสวยและยิ่งหาได้ยากมาก เป็นเพทายที่มีราคาแพงมากที่สุดในตระกูลพลอยชนิดนี้



รูปที่ 2.2 เพทายสีฟ้า

2.1.1.3 เพทายสีเหลือง มีทั้งสีเหลืองทองคล้ายบุษราคัมเหลืองเข้ม เหลืองเข้มอมน้ำตาล ซึ่งทุกสีล้วนแต่สวยงามด้วยประกายที่คล้ายเพชร



รูปที่ 2.3 เพทายสีเหลือง

2.1.1.4 เพทายสีอื่น ๆ เช่น สีแดง สีเขียว จัดว่าเป็นสีที่หาได้ยาก ที่พอจะพบได้บ้างก็มักจะเป็นเม็ดเล็ก ๆ



รูปที่ 2.4 เพทายสีแดง

2.1.1.5 เพทายสีอ่อน ๆ ต่าง ๆ เช่น สีเหลืองอมน้ำตาลจาง ๆ สีขาวอมเทา



รูปที่ 2.5 เพทายสีชนิดต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระดับมูลค่าสีของเพทายใน ตลาดค้าพลอยเรียงจาก มากไปน้อย

เพทายสีฟ้า > เพทายสีแดง > เพทายเหลือง > เพทายใส

2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเพทาย (Gibbs, W. Ann Phys, 1968)

Category	Mineral
Formula	zirconium silicate $ZrSiO_4$
Color	brown, red, yellow, green, black, and colorless.
Habit	dipyramidal prismatic
System	Tetragonal; $4/m\ 2/m\ 2/m$
Cleavage	indistinct, two directions
Fracture	Subconchoidal to uneven - brittle
Hardness	7.5
Luster	Adamantine
RI	$n=1.967 - 2.015$ $n=1.920 - 1.960$ (birefringence = $0.047 - 0.055$)
Streak	White
SG	4.6–4.7
Fusibility	Infusible
Solubility	Insoluble
Other	Fluorescent and radioactive

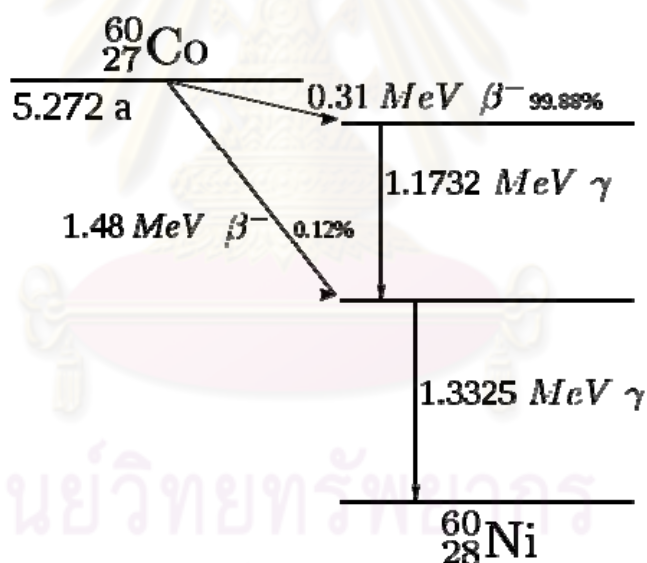


รูปที่ 2.6 photomicrograph ของ Zircon ที่ขยายให้เห็นโครงสร้างภายใน

2.3 รังสีแกมมา Gamma - rays (<http://www.nst.or.th/article/ray/ray01.htm>, 2550)

รังสีแกมมาเกิดจากการที่นิวเคลียสที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นกลับคืนสู่สถานะพื้นฐาน โดยจะปล่อยรังสีแกมมาออกมาส่วนใหญ่ออกมาหลังจากนิวเคลียสเริ่มต้น (parent) เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การสลายตัว หรือ เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ผลที่เกิดขึ้นก็คือได้นิวเคลียสใหม่ (daughter nuclers) และนิวเคลียสใหม่ที่ได้นี้อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเมื่อกลับสู่สถานะพื้นฐานเพื่อรักษาเสถียรภาพของตัวเอง ก็จะมีการปล่อยพลังงานออกมา พลังงานที่ปล่อยออกมานั้นก็คือรังสีแกมมานั่นเอง

เนื่องจากรังสีแกมมาคือพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากนิวเคลียสที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น ดังนั้น รังสีแกมมาจึงไม่มีมวล ไม่มีประจุ ทำให้มีอำนาจทะลุทะลวงสูงมาก ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ไม่สามารถที่จะกั้นรังสีแกมมาให้หมดไปได้ เพียงแต่สามารถลดค่าพลังงานของรังสีได้เท่านั้น สมการการสลายตัวให้รังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ดังนี้



รูปที่ 2.7 ภาพการเกิดแกมมาจาก โคบอลต์-60

2.4 การเปลี่ยนสีอัญมณีโดยการฉายรังสี

(<http://www.nst.or.th/article/article143/article4821.htm>, 2550)

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของแสง ที่ตาเรามองเห็น ประกอบด้วยแถบสี 7 สี
(ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง)

เราสามารถมองเห็นภาพที่เกิดจากการตกกระทบของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในส่วนของแสง (Visible spectrum) ได้แก่ แสงสีแดง ส้ม เหลือง เขียว ฟ้า น้ำเงิน ม่วง ซึ่งรวมกันเป็นสีขาว หรือไม่มีสี เรามองเห็นสิ่งต่างๆ มีสี เนื่องจากมีสีบางส่วนของสเปกตรัมสูญเสียไปในกระบวนการดูดกลืนแสง สีที่เรามองเห็น จึงเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมที่สะท้อนออกมา หรือไม่ถูกดูดกลืน

2.4.1 กระบวนการทางฟิสิกส์ในการเกิดสีของแร่ธาตุภายในก้อนผลึก
ก้อนผลึกสามารถเกิดสี หรือเปลี่ยนสีได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน การทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงาน ซึ่งต้องใช้พลังงานที่มีค่าเฉพาะ หรือแสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะ ในแต่ละธาตุ

2.4.1.1 Luminescence: คือการที่อิเล็กตรอนกลับสู่ ground state โดยคายพลังงานที่ดูดกลืนไว้ออกมา ถ้ามีการคายแสงสีออกมา จะไม่พบการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าเปลี่ยนมุม เราอาจจะมองเห็นแสงส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืน เช่น ถ้าดูดกลืนแสงสีแดง หรือสีส้ม จะทำให้แสงสีนี้หายไป ทำให้มองเห็นสีที่เหลือ คือ เหลือง-เขียว-น้ำเงิน-ม่วง (Y+G+B+I+V)

2.4.1.2 Fluorescence: คือการที่อิเล็กตรอนกลับสู่ ground state โดยการเปล่งแสงที่มีพลังงานต่ำกว่าแสงที่ดูดกลืน (เปล่งแสงที่มีสีต่างจากแสงที่ดูดกลืน)

2.4.2 สารเจือปนที่ทำให้เกิดสีในอัญมณี

สิ่งที่ทำให้เกิดสีในก้อนแร่ คือสารเจือปน ซึ่งเป็นแร่ธาตุอื่นที่มีปะปนอยู่ในอัญมณีในปริมาณน้อย เช่น Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu ตัวอย่างเช่น ทับทิมที่มี Cr น้อยกว่า 1% จะทำให้เห็นเป็นสีชมพูหรือสีแดง แต่แร่อย่างเดียวกันที่ไม่มีใครเจียมจะเห็นว่าไม่มีสี ซึ่งแตกต่างจากอัญมณี

บางชนิด เช่น turquoise ซึ่งมีส่วนที่ทำให้เกิดสีเป็นองค์ประกอบหลักของอัญมณีถ้าเราดูที่พลอยชนิดเดียวกัน เช่น beryl การที่มีสารเจือปนที่ต่างกัน จะทำให้มีสีที่แตกต่างกัน

Beryl ที่เจือด้วยธาตุเหล็ก (Fe)

Aquamarine เป็น beryl ที่มี Fe^{++} , ทำให้มีสีฟ้า (blue)

Heliodor เป็น beryl ที่มี Fe^{+++} , ทำให้มีสีเหลือง (yellow)

Green beryl เป็น beryl เกิดจากส่วนผสมของ Fe^{2+} กับ Fe^{3+}

Beryl ที่เจือด้วยแมงกานีส (Mn):

Morganitic เป็น beryl ที่มี Mn^{++} ทำให้มีสีชมพู (pink)

Beryl ที่เจือด้วยโครเมียม Chromium (Cr):

Emerald มีสี emerald green เป็น beryl ที่มี Cr^{+++}

จะเห็นว่า Oxidation state ที่ต่างกัน เช่น Fe^{2+} กับ Fe^{3+} มีผลต่อสีเช่นกัน ถ้าไอออนของธาตุที่เจืออยู่ ทำให้เกิดสีได้ การเปลี่ยน oxidation state ก็ทำให้สีเปลี่ยนได้เช่นกัน การให้ความร้อนแก่ beryl สีเขียวหรือสีเหลือง จะทำให้ลดไอออนของเหล็ก ทำให้กลายเป็นสีฟ้า และทำให้มีราคาสูงขึ้น Mn^{+++} สามารถดูดกลืนแสงได้ดี ทางปลายของสเปกตรัมด้านสีฟ้า จึงทำให้มีสีเข้ม



รูปที่ 2.9 ภาพ Beryl แต่ละสี เกิดจากแร่ธาตุที่เจืออยู่ แตกต่างกัน สารเจือปนอย่างเดียวกันในอัญมณีต่างชนิดกัน ทำให้เกิดสีที่แตกต่างกัน

Chromium (Cr^{+++}) ในทับทิม (ruby) ทำให้เกิดสีแดง (red)

Chromium (Cr^{+++}) ในเบริล (beryl) ทำให้เกิดสีเขียว (emerald green)

Chromium (Cr^{+++}) ใน alexandrite ทำให้เกิดสีม่วงหรือแดง

ทั้งนี้ เนื่องจากโครเมียม ดูดกลืนแสงแตกต่างกัน เมื่ออยู่ใน Beryl, emerald, และ alexandrite

ในกรณีของทับทิม ช่วงแสงที่ผ่านได้มากที่สุด (มีการดูดกลืนต่ำ) คือ ช่วงสีแดงของสเปกตรัม จึงมองเห็นเป็นสีแดง แต่ในบางครั้งอาจมีช่วงแคบๆ ของสีน้ำเงินที่ผ่านไปได้ ทำให้เกิดเป็นสีม่วงในทับทิมสีแดง

ในกรณีของมรกต ช่วงแสงที่ผ่านได้มากที่สุด คือ สีเขียว ขณะที่สีอื่นถูกดูดกลืนเกือบหมด จึงทำให้มองเห็นเป็นสีเขียว

2.4.3 การแลกเปลี่ยนประจุ (Charge Transfer) ทำให้พลอยเปลี่ยนสี

การแลกเปลี่ยนประจุ สามารถเกิดขึ้นได้ในสารประกอบที่มีประจุต่างกันอย่างน้อยสองแบบ และมี Oxidation states หลายระดับ การแลกเปลี่ยนประจุสามารถทำให้เกิดสีที่มีความเข้มมากขึ้นในอัญมณีและแร่ธาตุหลายชนิด คำว่า การแลกเปลี่ยนประจุ (charge transfer) หมายถึง กระบวนการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกัน ระหว่างแต่ละธาตุ ตัวอย่างของธาตุที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุ ได้แก่



นอกจากนั้น ผลึกอาจประกอบด้วยธาตุเหล่านี้หลายชนิด ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนประจุระหว่างกันได้ พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากแสง สามารถทำให้เคลื่อนที่จากอะตอมหนึ่งไปอะตอมอื่นได้ ตัวอย่างเช่น

2.4.3.1 ผลึกที่ประกอบด้วยโลหะ (M) ซึ่งมี 2 oxidation states คือ M^{2+} และ M^{4+}

2.4.3.2 M^{2+} อาจสูญเสียอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็น M^{3+}

2.4.3.3 M^{4+} อาจได้รับอิเล็กตรอนจากข้อ 2 แล้วกลายเป็น M^{3+}

2.4.3.4 ดังนั้น ผลึกจึงอาจประกอบด้วย M^{3+} กับ M^{3+} หรือ M^{2+} กับ M^{4+}

จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคู่เหล่านี้ ซึ่งอธิบายได้ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนวงนอก (intervalence charge transfer)

2.4 การนำพลอยมาฉายด้วยรังสีแกมมา (วัลลภ บุญคง, 2548)

รังสีที่ใช้ได้จากไอโซโทป ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ส่วนใหญ่คือ Co-60 มีอายุครึ่งชีวิต 5.27 ปี ให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.17 MeV และ 1.33 MeV พลังงานเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การฉายรังสีอัญมณีด้วยแกมมา ไม่ก่อให้เกิดสารไอโซโทป ภายในเนื้ออัญมณี จัดว่าเป็นการฉายรังสีซึ่งได้อัญมณีที่ปลอดภัยที่สุด แต่การเปลี่ยนแปลงของสีจะได้ผลน้อยกว่ารังสีอื่นๆ

2.4.1 จุดประสงค์การปรับปรุงคุณภาพอัญมณีด้วยการฉายรังสีแกมมา

จุดประสงค์ของการวิจัยนี้ เพื่อปรับปรุงอัญมณีราคาถูกลง เนื่องจากสีไม่เป็นที่นิยมของตลาด ส่วนมากจะเป็นสีขาว ให้อัญมณีมีสีสันสวยงามขึ้นด้วยการฉายรังสีแกมมา



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีก่อนผ่านการฉายรังสีแกมมา



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีผ่านการฉายรังสีแกมมา 400 kGy และอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

2.6 กระบวนการในการเปลี่ยนแปลงสีของพลอย (วัลลภ บุญคง, 2548)

2.5.1 Color centers

Color centers คือการเกิดสีเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก (เกิดรอยในผลึกที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสง) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสี (radiation damage) เช่น ร่องรอยจากการได้รับรังสีแกมมา รังสีที่ได้รับอาจมาจากธรรมชาติ (จากแร่ธาตุ U, Th, K) หรือรังสีที่ถูกทำขึ้นมา ในบางครั้งแสง UV สามารถทำให้เกิด color centers ได้ ถ้าเกิดร่องรอยจากการได้รับรังสี อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งปกติ กระโดดขึ้นไปอยู่ที่ตำแหน่งว่างในโครงสร้างผลึก (trap) ผลึกชนิดหนึ่งอาจมี electron trap หลายชนิด

อิเล็กตรอนในแต่ละ trap จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นจำเพาะ สีที่เรามองเห็น จึงเป็นสีที่ไม่ถูกดูดกลืนจากอิเล็กตรอนใน trap เหล่านี้ ตัวอย่างเช่น

เพชรสีเขียว (Green diamond) เกิดจากในผลึกมีบางตำแหน่งที่ขาดอะตอมของคาร์บอน จึงเกิดการดูดกลืนแสงสีแดง

แร่เซอร์คอน (Zircon) บริสุทธิ์ไม่มีสี ถ้ามียูเรเนียมเจืออยู่จะให้สีน้ำเงิน ถ้าได้รับรังสีจากการสลายตัวของยูเรเนียม จะให้สีน้ำตาลแดง

เนื่องจาก Color center เป็นรูปแบบหนึ่งของร่องรอยความไม่สมบูรณ์ของผลึก ซึ่งสามารถเคลื่อนที่เมื่อได้รับพลังงาน โดยอาจเกิดจากการได้รับความร้อนหลายร้อยองศาเซลเซียส ตัวอย่างเช่น เซอร์คอนสีน้ำตาล (brown zircon) ได้รับความร้อน จะกลายเป็นสีน้ำเงิน บางครั้งการได้รับแสงแดด โดยเฉพาะ UV ก็มีพลังงานสูงพอที่จะทำให้ color center เคลื่อนที่ได้ ตัวอย่างเช่นกรณีของ amethyst

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกจาก Trap จะทำให้ color center เคลื่อนที่ไปด้วย และทำให้สีเปลี่ยนแปลงไปการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต อาจทำให้เกิด color center หลายตำแหน่ง แต่ละ trap ที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ มีระดับพลังงานต่างกัน และทำให้ใช้พลังงานไม่เท่ากันในการทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หลุดออกจาก trap หลักการนี้จึงใช้เป็นการกำหนดสีที่ต้องการ หรือไล่สีที่ไม่ต้องการ โดยการให้ความร้อน

กระบวนการในการเปลี่ยนแปลงสีของพลอยเนื่องมาจากการฉายรังสีนั้นยังไม่มีข้อมูลยืนยันที่แท้จริง แต่มีการศึกษายืนยันว่าการเปลี่ยนแปลงสีของพลอยเกี่ยวข้องกับกระบวนการคัลเลอร์เซนเตอร์ (Color Center) โดยกระบวนการเกิดคัลเลอร์เซนเตอร์ สามารถเกิดขึ้นโดยพลังงานจากรังสีหรือการเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนเข้าไปทำปฏิกิริยาให้ อิเล็กตรอนขาดหายไปจากตำแหน่งเดิม โดยการเกิดปฏิกิริยานี้จะเรียกว่า โฮลคัลเลอร์เซนเตอร์ (Hole Color Center, HCC) อิเล็กตรอนส่วนที่

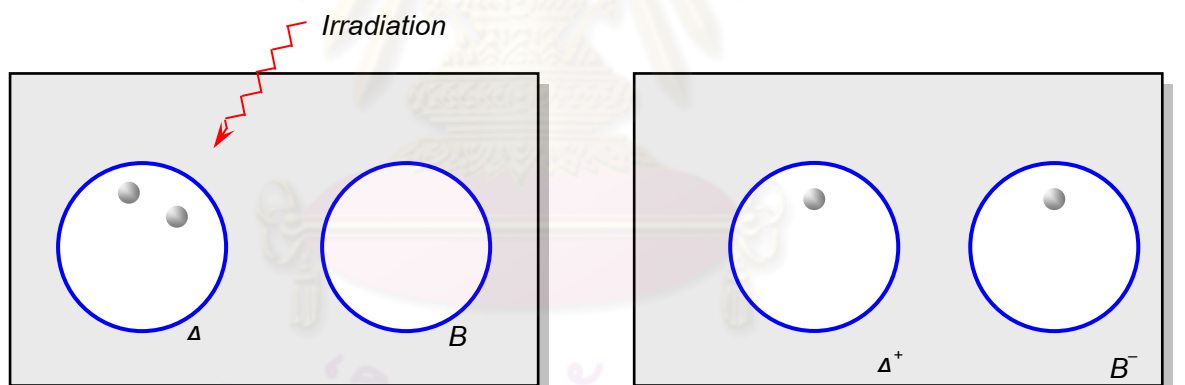
หลีกออกไปจับกับวงโคจรของอิเล็กตรอนชั้นถัดไปทำให้อิเล็กตรอนภายในวงโคจรนั้นเพิ่มขึ้น ผลจากปฏิกิริยานี้จะเรียกว่า อิเล็กตรอนคัลเลอร์เซนเตอร์ (Electron Color Center, ECC)

2.5.2 อัญมณีที่มีกระบวนการคัลเลอร์เซนเตอร์จะประกอบด้วยพีเคเซอร์ (Precursors) สองชนิดได้แก่

2.5.2.1 โฮลเซนเตอร์ พรีเคเซอร์ (Hole Center Precursor, HCP) ซึ่งเป็น สารเจือปน (Impurity) และ จุดบกพร่องเชิงผลึก (Crystal deflection) โดยปัจจัยนี้จะประกอบไปด้วยคู่อิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนตัวหนึ่งจะถูกพลังงานจากการฉายรังสีทำให้หลุดออกพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยา HCC

2.5.2.2 อิเล็กตรอนเซนเตอร์ พรีเคเซอร์ (Electron Center Precursor, ECP) ซึ่งเป็นอะตอมและไอออนหรืออื่นๆ ที่สามารถจับอิเล็กตรอนที่หลีกออกมาจาก โฮลเซนเตอร์พรีเคเซอร์ทำให้เกิดปฏิกิริยา ECC

ดังนั้นกระบวนการฉายรังสีจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการย้ายที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิด HCC และ ECC ไปพร้อมๆ กัน หากพลอยชนิดใดมีแต่ HCC แต่ไม่มี ECC เมื่อถูกฉายรังสี อิเล็กตรอนก็สามารถกลับไปอยู่ในตำแหน่งเดิมได้และสีของพลอยนั้นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง



Electron Center Precursor Hole Center Precursor

Hole Color Center Electron Color Center

รูปที่ 2.12 ภาพแสดงกระบวนการเกิด คัลเลอร์เซนเตอร์ (Color Center) ของอัญมณี

จากกระบวนการฉายรังสีด้านซ้ายเป็นการเกิดก่อนแล้วตามด้วยด้านขวาเกิดตามที่หลัง

ในรูปที่ 2.13 ทางซ้าย ส่วน A คือ HCP ซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อส่วนนี้ได้รับรังสีก็จะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนทำให้มีประจุบวกเป็น A^+ ในรูป และ ECP ซึ่งแต่เดิมเป็นกลางอยู่เมื่อรับอิเล็กตรอนมากก็จะกลายเป็น B^- แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อมูลยืนยันว่าทั้ง A , A^+ , B หรือ B^- เป็นคัลเลอร์เซนเตอร์ อิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่สามารถถูกกระตุ้นให้มีพลังงานสูงขึ้นได้ด้วยพลังงานแสงขาว (White light) เมื่อ อิเล็กตรอนกลับมาสู่สภาพเดิมก็จะคายพลังงานออกมาเป็นแสงในช่วงสีที่

มันดูดกลืนเข้าไปทำให้เกิดเป็นสีขึ้น ทั้ง HCC และ ECC สามารถดูดกลืนแสงและให้สีได้ หาก ความร้อนหรือแสงทำให้ปรากฏการณ์กลับคืออิเล็กตรอนจาก ECC B^- กลับไปที่ HCC A^+ ทำให้ A เป็นกลาง สีอัญมณีนั้นจะกลับไปเหมือนเดิม เรียกกระบวนการนี้ว่า การจางสี (Fading) หรือ การฟอกสี (bleaching) หากพลังงานในการยึดจับอิเล็กตรอนน้อย การใช้พลังงานดังกล่าวไม่สูง มากนักคือประมาณ 0.1 อิเล็กตรอนโวลต์ แม้อุณหภูมิห้องและไม่ต้องมีแสงก็สามารถทำให้สีที่ เปลี่ยนแปลงกลับไปเหมือนเดิมได้ หากพลังงานในการจับอิเล็กตรอนสูงมาก สีอัญมณีจะคงทน ไม่จางเมื่อถูกแสง เช่น smoky quartz, amethyst, blue topaz, yellow sapphire และ brown topaz หากต้องการให้เกิดการฟอกสี อาจต้องใช้อุณหภูมิถึง 500°C จึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ระยะเวลาในการให้ความร้อนก็มีความสำคัญในการทำให้เกิดการฟอกสีด้วยเช่นกัน

ในกรณีที่อัญมณีบางชนิดมี HCC เพียงหนึ่งตำแหน่งแต่มี Electron Trapping Center หลายตัวผลของการฉายรังสีมีลักษณะในทำนองเดิมแต่อุณหภูมิในการฟอกสีจะเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นกับ ECC ในอัญมณีแต่ละชนิด ตัวอย่างเช่น สีของ smoky quartz ซึ่งมาจากแหล่งต่างๆ จะ เปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกความร้อนในอุณหภูมิตั้งแต่ $140 - 400^\circ\text{C}$ อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีการยึดจับ อิเล็กตรอนใน ECC เป็นตัวให้สีอัญมณีแต่ HCC ของอัญมณีจากแหล่งต่างๆที่มีความแตกต่างกัน อาจต้องการพลังงานต่างๆกันเพื่อให้เกิดสีและสีของอัญมณีเหล่านั้นก็มีความแตกต่างกัน

2.7 สี (<http://www.thaigoodview.com/node/15578, 2550>)

สีเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในการดำรงชีวิต ซึ่งมนุษย์รู้จัก สามารถ นำมาใช้ให้เกิด ประโยชน์ในชีวิตประจำวันมาตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ ในอดีตกาล มนุษย์ได้ค้นพบสีจากแหล่งต่าง ๆ จากพืช สัตว์ ดิน และแร่ธาตุนานาชนิดจากการ ค้นพบสีต่าง ๆ เหล่านั้น มนุษย์ได้นำเอาสีต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยนำมาระบายลงไปบนสิ่งของ ภาชนะเครื่องใช้ หรือระบายลง ไปบนรูปปั้น รูปแกะสลัก เพื่อให้รูปเด่นชัดขึ้น มีความเหมือนจริงมากขึ้น รวมไปถึงการใช้สีวาดลง ไปบนผนังถ้ำ หน้าผา ก้อนหิน เพื่อใช้ถ่ายทอด เรื่องราวและทำให้เกิดความรู้สึกถึงพลังอำนาจที่มี อยู่เหนือสิ่งต่าง ๆ ทั้งปวง การใช้สีทาตามร่างกายเพื่อกระตุ้นให้เกิดความฮึกเหิม เกิดพลังอำนาจ หรือใช้สีเป็นสัญลักษณ์ในการถ่ายทอดความหมายอย่างใดอย่างหนึ่ง ในสมัยเริ่มแรก มนุษย์รู้จัก ใช้สีเพียงไม่กี่สี สีเหล่านั้นได้มาจากพืช สัตว์ ดิน แร่ธาตุต่าง ๆ รวมถึงขี้เถ้า เขม่าควันไฟ เป็นสีที่ พบทั่วไปในธรรมชาตินำมาดูทา

ต่อมาเมื่อทำการย่างเนื้อสัตว์ ไขมัน น้ำมัน ที่หยดจากการย่างลงสู่ดิน ทำให้ดินมี สีสน น่าสนใจ สามารถนำมาระบายลงบนวัตถุและติดแน่นทนนาน ดังนั้นไขมันนี้ จึงได้ทำหน้าที่เป็น ส่วนผสม (Binder) ซึ่งมีความสำคัญในฐานะเป็นสารชนิดหนึ่ง ที่เป็นส่วนประกอบของสี ทำหน้าที่

เกาะติดผิวหน้าของวัสดุที่ถูกลำไปทาหรือ ระบาย นอกจากไขมันแล้วยังได้นำไขขาว ขี้ผึ้ง (Wax) น้ำมันลินสีด (Linseed) กาวและยางไม้ (Gum Arabic) เคซีน (Casein: ตะกอนโปรตีนจากนม) และสารพลาสติกโพลีเมอร์ (Polymer) มาใช้เป็นส่วนผสม ทำให้เกิดสีชนิดต่าง ๆ ขึ้นมา

2.8 แสงสี (<http://www.prc.ac.th/newart/webart/colour06.htm>, 2550)

แสง เป็นพลังงานรังสี (Radiation Energy) ที่ตารับรู้และมีปฏิกิริยาตอบสนองด้วยกระบวนการ วิเคราะห์แยกแยะของสมอง ตาสามารถวิเคราะห์พลังงานแสงโดยการรับรู้วัตถุสัมพันธ์กับตำแหน่ง ทิศทาง ระยะทาง ความเข้มของแสง และความยาวคลื่นที่มองเห็นได้



รูปที่ 2.13 แสดงสีตามความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร

คือลักษณะความเข้มของแสงที่ปรากฏแก่สายตาให้เห็นเป็นสี โดยผ่านกระบวนการรับรู้ด้วยตา มองจะรับข้อมูลจากตา โดยที่ตาได้ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานแสงมาแล้วผ่านประสาท สัมผัสการมองเห็น ผ่านศูนย์สับเปลี่ยนในสมองไปสู่ศูนย์การมองเห็นภาพ การสร้างภาพหรือการมองเห็นก็คือ การที่ข้อมูลได้ผ่านการวิเคราะห์แยกแยะให้เรารับรู้ถึงสรรพสิ่งรอบตัว

2.9 การประเมินสีอัญมณี (รศ.ดร.กาญจนา ชูครุวงศ์, 2541)

พลอย หรือในภาษาอังกฤษเรียกว่า Colored stone อัญมณีเช่นเพชรมีระบบการประเมินสีที่เป็นมาตรฐานเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกในระบบของ The Gemological Institute of America (GIA) ของสหรัฐอเมริกา ระบบ Hoge Raad Voor Diamant (HRD) ของเบลเยียม ระบบ Confederation Internationale de la Bijouterie , Joaillerie , Orfevriere , Des Diamants , Perles et Pierres (CIBJO) ซึ่งเป็นสมาคมนานาชาติ Internaional Diamond Council (IDC) และ Scandinavian Nomenclature (Scan.D.N.) ซึ่งเป็นสมาคมของกลุ่มประเทศเดนมาร์ก ฟินแลนด์ นอร์เวย์ และ สวีเดน แต่สำหรับการประเมินสีของพลอยยังไม่มีมาตรฐานใดๆในโลกที่เป็นที่ยอมรับว่าเป็นมาตรฐานสากล ในประเทศไทย สถาบัน Asian Institute of Gemological Sciences ได้พยายามตั้งมาตรฐานในการประเมินสีพลอยด้วยเช่นกัน แต่ยังไม่แพร่หลายเป็นที่

ยอมรับของวงการอุตสาหกรรมในประเทศ ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบการประเมินคุณภาพสีของพลอยที่ใช้ในการเรียนการสอนของสถาบัน The Gemological Institute of America (GIA)

2.9.1 การตรวจสอบสีด้วยระบบของ GIA

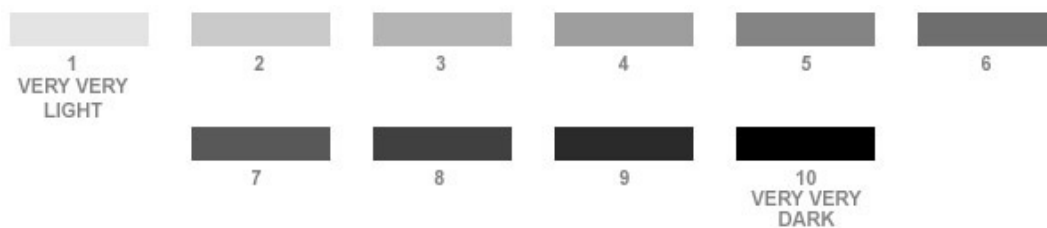
การแบ่งสีช่วงสีใดในระบบ GIA จะพิจารณาจากราง grading Chart และเมื่อพิจารณาการแบ่งช่วงของสีสันของสีพลอยแบ่งออกได้เป็น

2.9.1.1 Hue (สี) คือสีต่างๆของพลอยได้แก่ แดง ส้ม เหลือง เขียว น้ำเงินหรือฟ้า และม่วง เป็นต้น ซึ่งการเรียนสีพลอยจะเรียกสีที่เด่นชัดก่อนแล้วตามด้วยสีที่เจือปน เช่น น้ำเงินแกมเขียว สำหรับภาษาอังกฤษจะเรียกชื่อสีเจือปนก่อน แล้วตามด้วยสีเด่น เช่น greenish blue หากเป็นสีเจือปนเล็กน้อยจะใช้คำว่า Slightly greenish blue ในระบบของ GIA ใช้เรียกสีพลอยจำนวน 31 สี



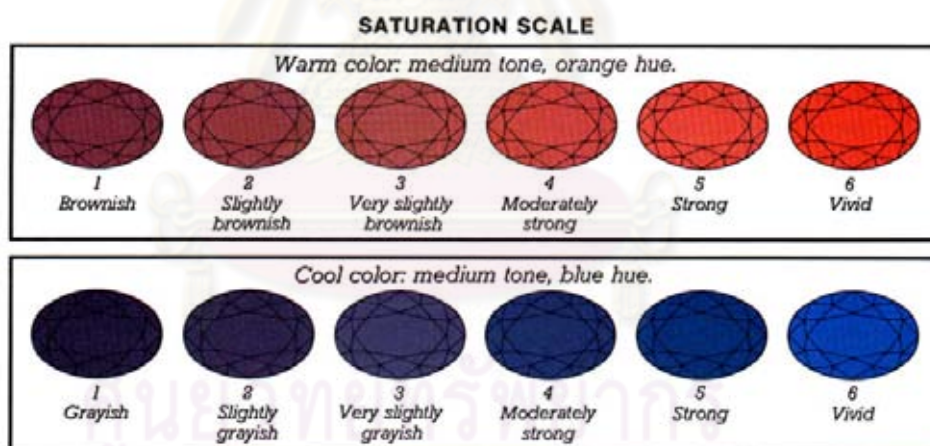
รูปที่ 2.14 แสดงแถบสี (Hue) ของ grading color ในระบบเกรดสี GIA

2.9.1.2 Tone (ความสว่างและมีดของสี) ในระบบของ GIA แบ่งระดับ tone หรือความสว่างและมีดของสีออกเป็น 11 ระดับ เริ่มจาก 0 หมายถึงใสไม่มีสี (Colorless) หรือขาว white หากเป็นพลอยโปร่งแสงหรือทึบแสงไปถึง 10 หมายถึง ดำ (Black) โดยทั่วไปหากเป็นพลอยโปร่งใส (transparent) จะมีค่า tone ตั้งแต่ 2-8 ในแต่ละระดับของ tone จะใช้ตัวเลขกำกับและตัวเลขนั้นมีความหมายค่าๆกัน ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงแถบความสว่าง (Tone) ของ grading color ในระบบเกรดสี GIA

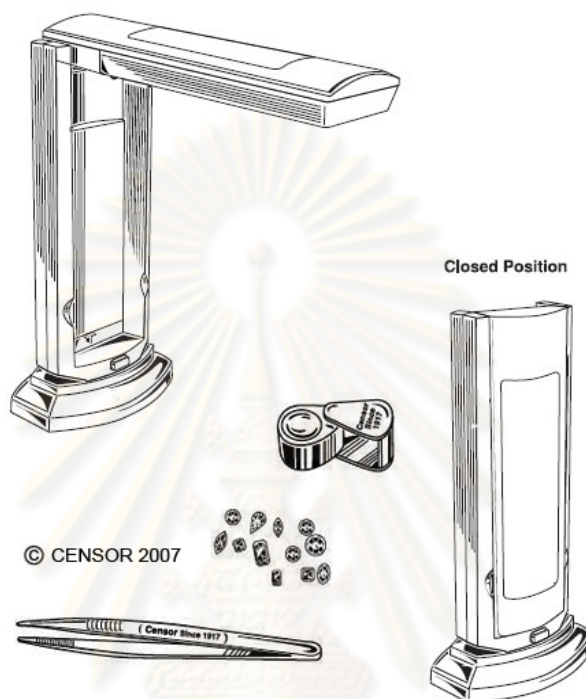
2.9.1.3 Saturation ความบริสุทธิ์ของสี ในบางกรณีอาจเรียกว่าความเข้มของสี (Intensity) หมายถึงปริมาณความเข้มหรือความบริสุทธิ์ของสี (hue) แสดงได้เช่นสีแดงสด (bright red) และเขียวสด (Vibrant green) หมายถึงสีที่มีความเข้มมากที่สุด ในทางตรงกันข้ามหากเป็นสีแดงแกมน้ำตาล (rust red) และเขียวมะกอก (olive green) จะเป็นสีที่มีความเข้มของสีน้อยเพราะเห็นเป็นสีน้ำตาลและเทา เนื่องจากหากเป็นกลุ่มของสีร้อนเช่นสีแดง ส้ม เหลือง หากมีความเข้มหรือความบริสุทธิ์ของสีน้อยจะเห็นเป็นสีน้ำตาล และหากเป็นกลุ่มสีเย็น เช่น สีน้ำเงิน น้ำเงินเขียว และ ม่วงจะเห็นเป็นสีเทาหากมีความบริสุทธิ์ของสีน้อย ในระบบของ GIA จำแนกระดับของ Saturation เป็น 6 ระดับ เริ่มจากเลข 1 คือสีเทาหรือน้ำตาล ไปจนถึง 6 ซึ่งหมายถึงเข้มจัด (vivid) ดังแสดงในแผนภูมิที่ พลอยที่มีสีมืด (Dark tone)



รูปที่ 2.18 แสดงแถบความบริสุทธิ์ของสี (Saturation) ของ grading color ในระบบเกรดสี GIA

2.9.2 สภาพแวดล้อมในการประเมินคุณภาพสี ใช้แสงไฟ day-light-equivalent ซึ่งในกรณีนี้หมายถึงแสงไฟที่ปรับให้เทียบเท่าแสง ธรรมชาติในเวลากลางวัน (north daylight) ทั้งนี้ห้ามใช้แสงไฟที่มีสีเหลืองหรือสีแดงมาก สภาพแวดล้อมในการประเมินคุณภาพสีของพลอยมีความสำคัญควรอยู่ในห้องสีอ่อนหรือเป็นสีกลางๆ (neutral) สุขภาพของผู้ประเมินก็มีความสำคัญไม่ควรอ่านค่าสีติดต่อกันต่อเนื่อง 2-3 ชั่วโมง กล้ามเนื้อตาที่ล้าจะทำให้การเทียบสีผิดเพี้ยน และ

การประเมินสีต้องประเมินควรรอยู่ในห้องที่ผนังสีอ่อนๆหรือกลางๆ (neutral colors) โดยทั่วไปหาที่มีแสงไฟเพียงพอจะมีความสามารถจำแนกได้สีถึง 150 สีโดยที่มีสีในสเปคตรัมรวม 130 สี และ อีก 20 สีอยู่ในกลุ่มสีม่วง



รูปที่ 2.19 หลอดไฟประเภท fluorescent สำหรับประเมินสีอัญมณีชนิดของแสงไฟ

2.9.3 ขั้นตอนในการประเมินคุณภาพสีอัญมณีมีดังนี้

2.9.3.1. ทำความสะอาดพลอยทั้งเม็ด

2.9.3.2. จับพลอยบริเวณขอบด้วยขอบหรือปากคีบพลอย มองดูด้านหน้าพลอย โดยห่างจากสายตา 18 นิ้วเมื่อแสงไฟที่ใช้ดูเป็นแสงที่แรงและผ่านแผ่นกรองแสงและห่างจากพลอยประมาณ 6-10 นิ้ว เมื่อใช้แสง daylight-equivalent

2.9.3.3. จะต้องวิเคราะห์และตัดสินว่าพลอยเม็ดนั้นมีสีอะไรโดยไม่ต้องคำนึงถึงบริเวณที่มีเม็ดและสว่างของพลอย และให้พิจารณาองค์ประกอบของสี tone, hue และ saturation

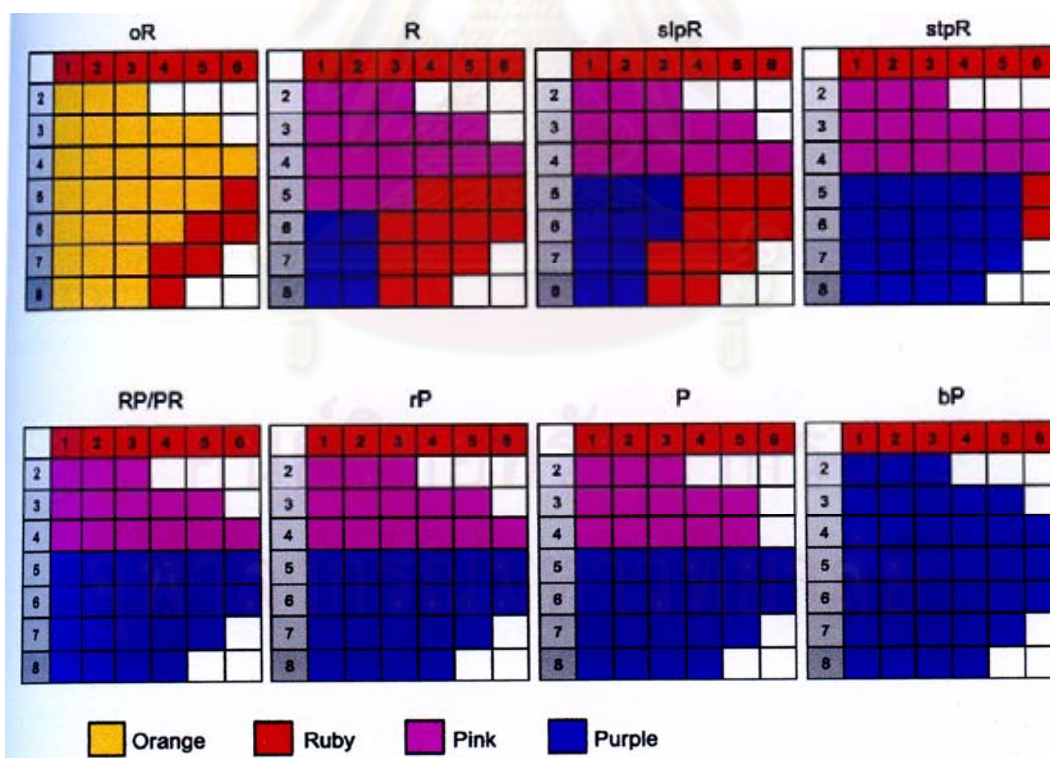
2.9.3.4. ประมาณการณ์ tone ของสีพลอยโดยดูทั่วทั้งเม็ดไม่ใช่บริเวณใดบริเวณหนึ่งใช้ตัวอย่างสี tone ของ GIA และใส่ภายใต้หัวข้อสีหลัก

2.9.3.5. บอกสีหลักของพลอยโดยใช้ แผ่นเทียบสีของระบบสี GIA และใส่สีพลอยภายใต้ หัวข้อสีหลัก โดยดูพลอยห่างจากสายตา 18 นิ้ว ให้ดูบริเวณที่เห็นสีเด่นชัดของพลอย ดูสีพลอยโดย ยกเว้นส่วนที่มีมืดและสว่างของพลอย สีที่จะต้องดูจะดูอยู่บริเวณระหว่าง 2 ส่วนนั้น ซึ่งมักจะเป็น บริเวณ bezel ของส่วน crown ให้ยกเว้นแสงที่เกิดจากการกระจายแสงและความระยิบระยับของ พลอยด้วย

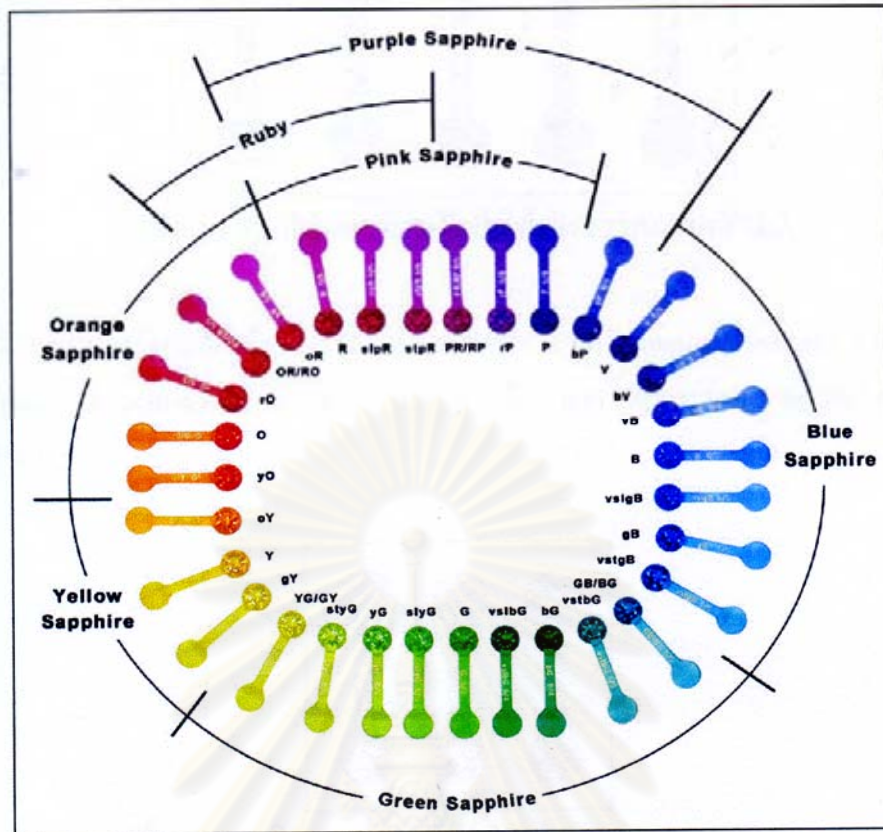
2.9.3.6. การประมาณการณ์ saturation ของสีพลอยนั้น โดยเปรียบเทียบกับตารางสี ตัวอย่างของ GIA สีที่มี saturation ต่ำจะมองดูเหมือนสีเทาหรือน้ำตาลในพลอยที่มีสีมืด (darker tone) และในทางกลับกันหากพลอยมีสีอ่อน (light tone) ก็จะถูกเหมือนใสไม่มีสีเมื่อ saturation ต่ำ

2.9.3.7. ใส่ตัวเลขกำกับสีที่ได้ประเมินไว้โดยดูจากตารางสีของ GIA

2.9.3.8. ดูสีเพิ่ม (additional color) และให้ดูตามองค์ประกอบทั้ง 3 เช่นเดียวกับการ ประเมินสีหลักของพลอยที่กล่าวมา



รูปที่ 2.20 ตาราง grading chart ใช้สำหรับวงสีอัญมณี



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างของแผ่นเทียบและประเมินสี ที่ใช้ในการประเมินสีในระบบของ GIA



รูปที่ 2.22 แผ่นเทียบและประเมินสี ที่ใช้ในการประเมินสีในระบบของ GIA

ตัวอย่างศัพท์ในการใช้เขียนสัญลักษณ์ Hue

Hue	ตัวย่อ
Red-purple	RP
Slightly purplish red	slpR
Orangy red	oR
Orange	R
Yellowish orange	yO
Orangy yellow	oY
Yellow	Y
Greenish yellow	gY
Green	G
Very slightly bluish green	vslbG
Greenish blue	gB
Violetish blue	vB
Bluish violet	bV
Violet	V

ตัวอย่างศัพท์ในการใช้เขียนสัญลักษณ์ Tone

Tone	ตัวย่อ
0 colorless or white	c(w)
1 extremely light	exl
2 very light	vl
3 light	l

4 medium light	ml
5 medium	m
6 Medium dark	md
7 dark	d
8 very dark	vd
9 extremely dark	exd
10 black	bl

ตัวอย่างศัพท์ในการใช้เขียนสัญลักษณ์ Saturation

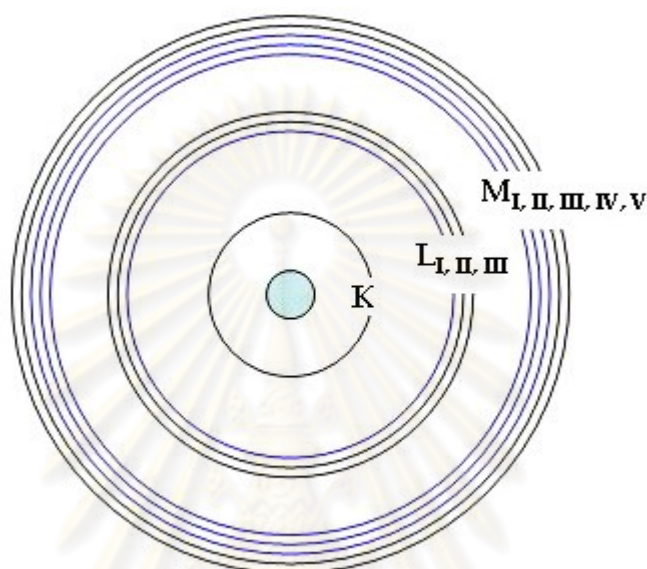
Saturation	ตัวย่อ
1 greenish (brownish)	gr(br)
2 slightly grayish (brownish)	slgr (slbr)
3 very slightly grayish (brownish)	vslgr (vslbr)
4 moderately strong	mst
5 strong	st
6 vivid	v

2.10 การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

(<http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>, 2552)

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (Characteristic X ray) ของแต่ละธาตุ

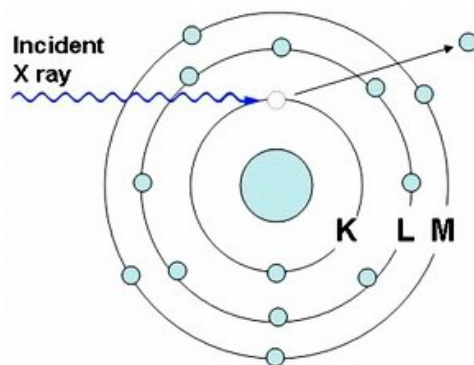
อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม แบ่งเป็นชั้น (Shells) โดยชั้นในสุด ได้แก่ ชั้น K มีระดับพลังงาน (energy level) ต่ำสุด ถัดออกมา ได้แก่ ชั้น L, M, N ... ซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้จากอิเล็กตรอนในชั้น K ที่มีระดับพลังงานเดียวแล้ว อิเล็กตรอนในชั้นอื่น ยังแบ่งเป็นชั้นย่อย ได้แก่ LI, LII, LIII และ MI, MII, MIII, MIV, MV ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน



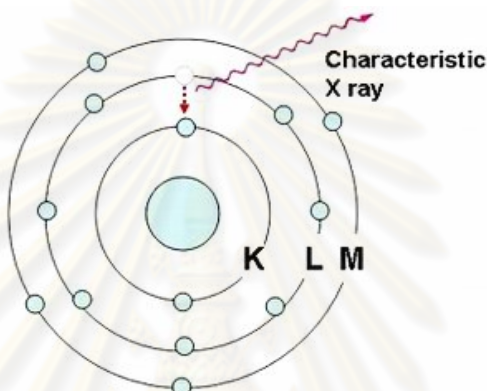
รูปที่ 2.23 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น

อิเล็กตรอนในแต่ละชั้นของวงโคจร มีพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ที่ได้รับจากนิวเคลียสแตกต่างกัน อิเล็กตรอนวงในที่อยู่ใกล้นิวเคลียส จะได้รับพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่าอิเล็กตรอนวงนอก และธาตุที่มีเลขอะตอม (Z) สูงขึ้น จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ออิเล็กตรอนมากขึ้น

เมื่อยังรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอน หรือโปรตอนไปยังอะตอมของธาตุ จะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ เช่น จากชั้น L ไปชั้น K จากชั้น M ไปชั้น K หรือจากชั้น M ไปชั้น L โดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ



รูปที่ 2.24 รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร

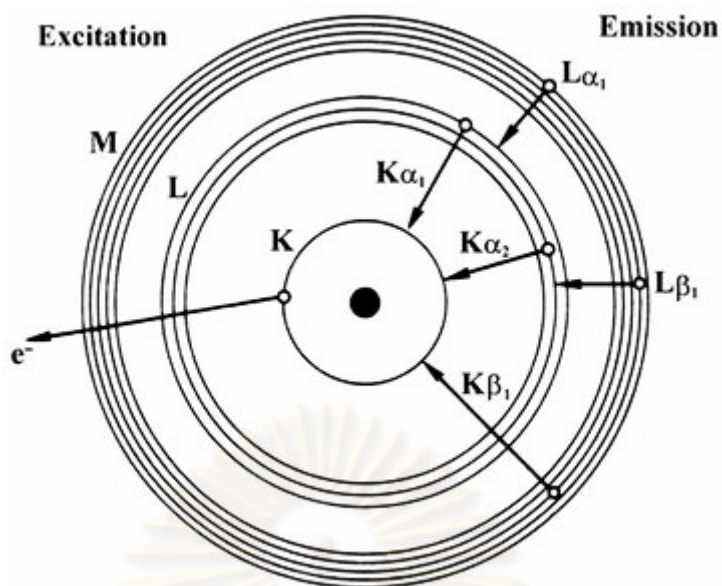


รูปที่ 2.25 อิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่

โดยคายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา

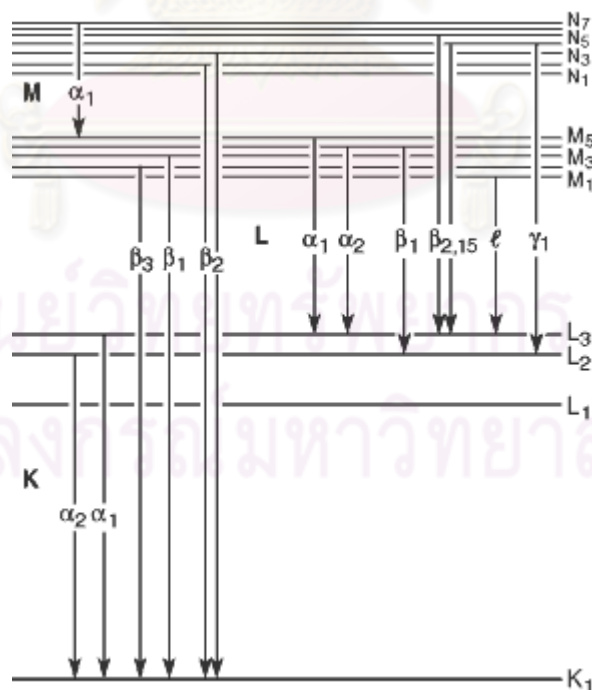
รังสีเอกซ์จำเพาะ (Characteristic X-ray) ที่เกิดจากอิเล็กตรอนในชั้นที่สูงกว่า ลงไปแทนที่ว่างในชั้น K เรียกว่า K radiation หรือ K X-ray และเรียกว่า L radiation หรือ L X-ray ถ้าเป็นรังสีเอกซ์ที่เกิดจากอิเล็กตรอน ลงไปแทนที่ว่างในชั้น L โดยส่วนใหญ่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากวงโคจรจะเป็นอิเล็กตรอนในชั้น K ทำให้รังสีเอกซ์จำเพาะที่คายออกมา มีความเข้มของ K X-ray มากกว่า L X-ray

รังสีเอกซ์จำเพาะจากอิเล็กตรอนในชั้นที่สูงกว่าหนึ่งระดับจะกำกับด้วยเครื่องหมาย a เช่น อิเล็กตรอนจากชั้น L ไป K = $K\alpha$ หรือ อิเล็กตรอนจากชั้น M ไป L = $L\alpha$



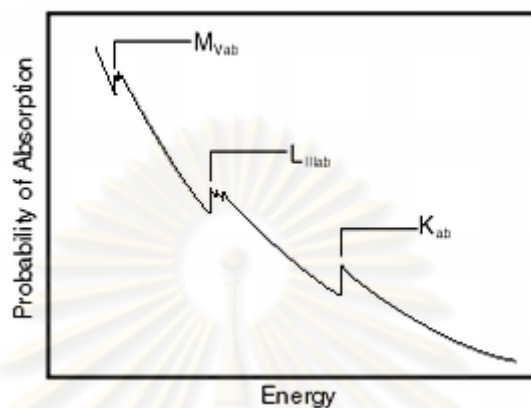
รูปที่ 2.26 สัญลักษณ์ของรังสีเอกซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน

รังสีเอกซ์จำเพาะจากอิเล็กตรอนในชั้นย่อยของแต่ละระดับที่ลงไปแทนที่ว่าง จะกำกับเพิ่มด้วยหมายเลข เช่น อิเล็กตรอนจากชั้นย่อยของ LIII ไป K = $K\alpha_1$ และ LII ไป K = $K\alpha_2$ หรือ MIV ไป LIII = $L\alpha_1$ และ MIV ไป LIII = $K\alpha_2$ นอกจากนี้ รังสีเอกซ์จากอิเล็กตรอนจากชั้นอื่นที่ลงมาแทนที่ จะมีเครื่องหมายและหมายเลขกำกับแตกต่างกัน เช่น $K\beta_1$, $K\beta_2$, $L\beta_1$, $L\beta_2$, $L\gamma_1$, $L\gamma_2$

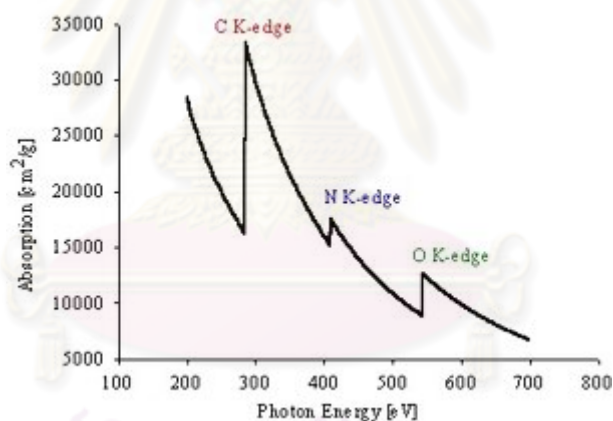


รูปที่ 2.27 สัญลักษณ์ของรังสีเอกซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน

รังสีที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม จะต้องมีความถี่สูงกว่าความถี่ขีดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน หรือ แอบซอร์ปชันเอจ (Absorption edge) โดยจะมีสัมประสิทธิ์ในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อมีความถี่ใกล้เคียงกับ absorption edge และจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่ที่เข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานสูงขึ้น โดยมีค่าแตกต่างกันสำหรับอิเล็กตรอนแต่ละชั้นและแตกต่างกันในแต่ละธาตุ



รูปที่ 2.28 แอบซอร์ปชันเอจของอิเล็กตรอนในชั้น K, L, M



รูปที่ 2.29 แอบซอร์ปชันเอจของคาร์บอน ไนโตรเจนและออกซิเจน

การหาชนิดของธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์จำเพาะ ขณะที่การหาปริมาณธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่คายออกมา ตารางที่ 2 แสดงค่าของ absorption edge ของอิเล็กตรอนในชั้น K และชั้น L และค่าของพลังงานรังสีเอกซ์จำเพาะของแต่ละธาตุ

Element	Z	Kabs	K α 1	K β 1	L-IIIabs	L α 1	L β 1
F	9	0.687	0.677				
Na	11	1.072	1.041	1.067			
Mg	12	1.305	1.253	1.295			
Al	13	1.559	1.486	1.553			
Si	14	1.838	1.740	1.829			
P	15	2.142	2.013	2.136			
S	16	2.472	2.307	2.464			
Cl	17	2.822	2.622				
Ar	18	3.202	2.957	3.190			
K	19	3.607	3.313	3.589			
Ca	20	4.038	3.691	4.012	0.346	0.341	0.345
Sc	21	4.496	4.090	4.460	0.403	0.395	0.400
Ti	22	4.965	4.510	4.931	0.454	0.452	0.458
V	23	5.465	4.951	5.426	0.513	0.511	0.519
Cr	24	5.989	5.414	5.946	0.574	0.573	0.583
Mn	25	6.540	5.898	6.489	0.641	0.637	0.649
Fe	26	7.112	6.403	7.057	0.709	0.705	0.718
Co	27	7.709	6.929	7.648	0.779	0.776	0.791
Ni	28	8.333	7.477	8.263	0.855	0.851	0.869
Cu	29	8.979	8.046	8.904	0.932	0.930	0.950
Zn	30	9.659	8.637	9.570	1.021	1.012	1.034
Sr	38	16.105	14.163	15.833	1.940	1.806	1.871
Zr	40	17.998	15.772	17.665	2.223	2.042	2.124
Ba	56	37.441	32.188	36.372	5.247	4.465	4.827
La	57	38.925	33.436	37.795	5.483	4.650	5.041
Ce	58	40.449	34.714	39.251	5.724	4.839	5.261
Nd	60	43.571	37.355	42.264	6.208	5.229	5.721
Hf	72	65.351	55.781	63.222	9.561	7.898	9.021

ภาพที่ 2.30 แอ็บซอร์บชันเอจ (Absorption edge) และ

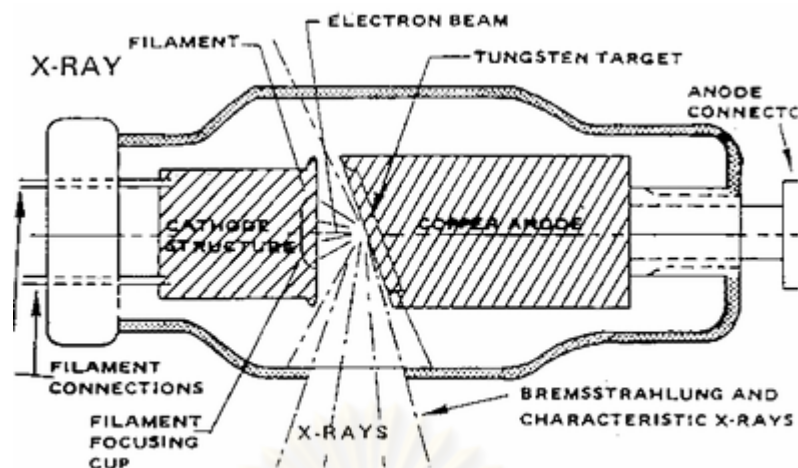
พลังงานของรังสีเอกซ์จำเพาะ (keV) ของธาตุ

การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยทั่วไป จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม โดยใช้รังสีเอกซ์พลังงานสูงจากหลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) หรือไอโซโทปรังสี (radioisotope) ที่ให้รังสีเอกซ์

หลอดรังสีเอกซ์ประกอบด้วยไส้หลอด (Filament) ที่เป็นแคโทด (cathode) หรือขั้วลบ และแอโนด (anode) หรือขั้วบวกที่มีความต่างศักย์สูง (high voltage) ทำด้วยโลหะที่มีเลขอะตอมสูงและทนความร้อนได้ดี เช่น W, Mo หรือ Rh เมื่อป้อนไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้เกิดความร้อนที่คาโทดและมีอิเล็กตรอนหลุดออกมา ความต่างศักย์จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าชนแอโนดที่เป็นเป้า (target) และปล่อยรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง หรือเบรมสตราห์ลุง (Bremsstrahlung) ออกมา โดยมีความเข้ม (I) แปรผันตามกระแสไฟฟ้า (i) ศักย์ไฟฟ้า (V) และเลขอะตอม (Z) ของธาตุที่ใช้ทำแอโนด ตามสมการ

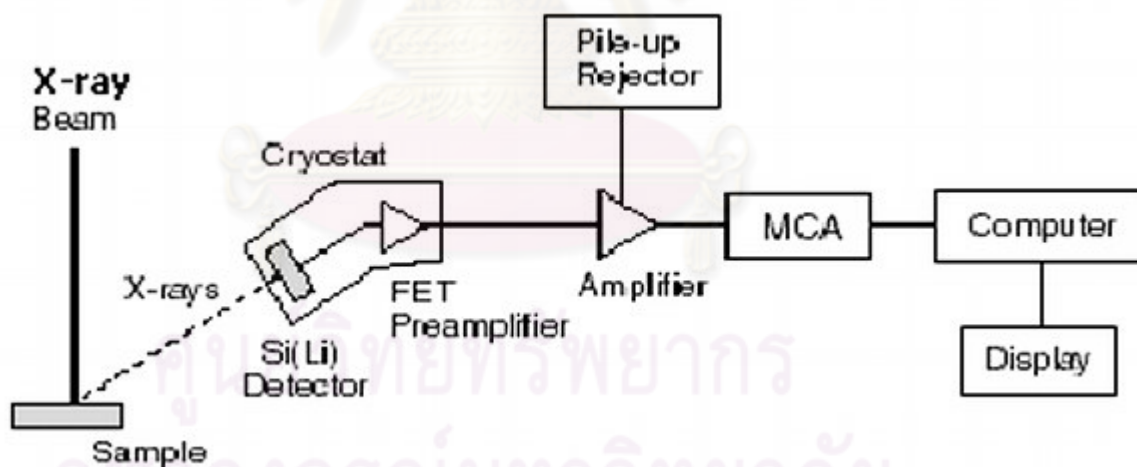
$$I = kiZV^2$$

โดย k เป็นค่าคงที่

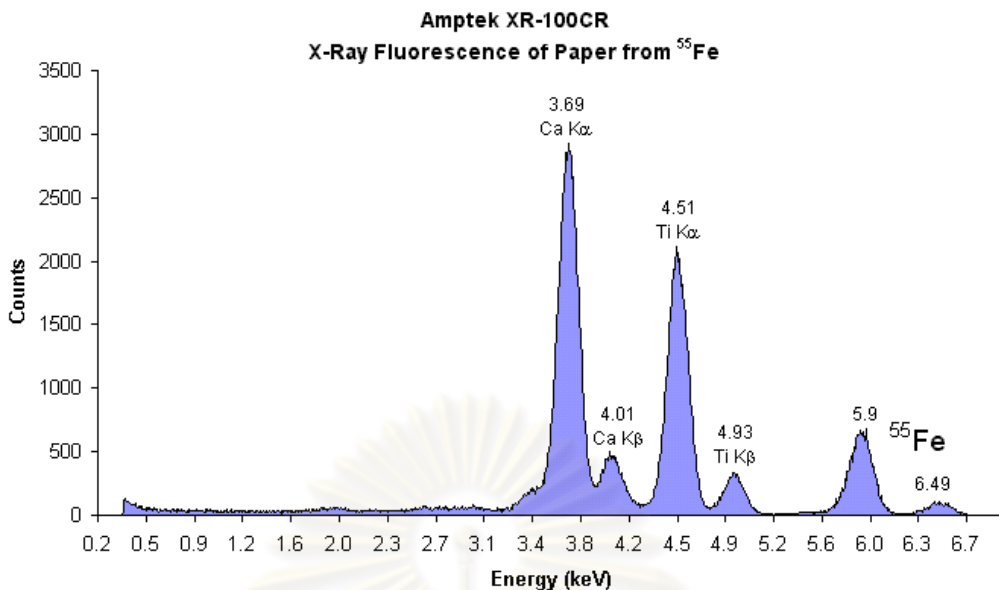


ภาพที่ 2.31 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์

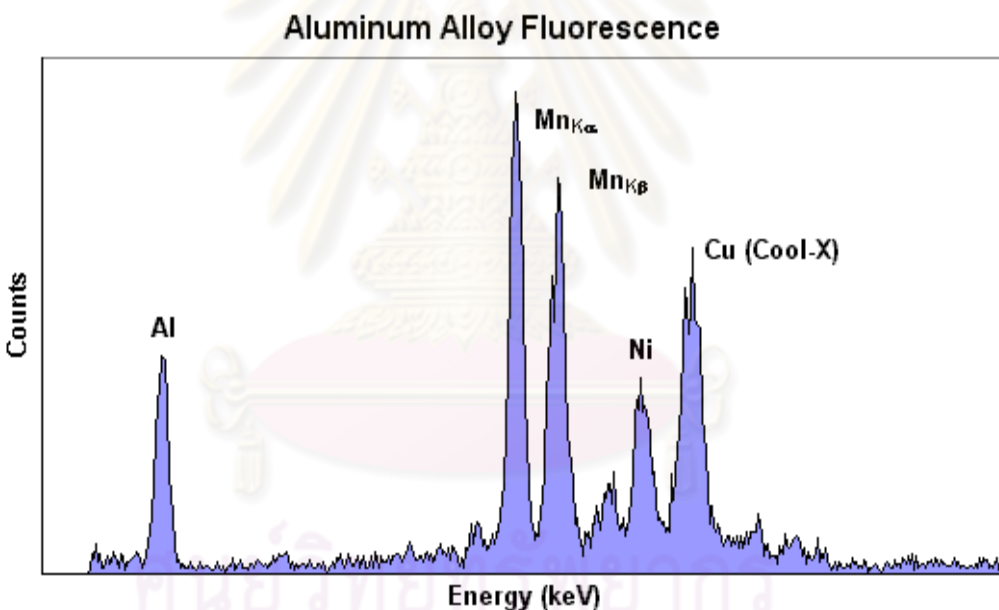
ไอโซโทปรังสีที่ใช้ในงานเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นไอโซโทปที่ให้รังสีเอกซ์ ได้แก่ Fe-55, Cd-109, Am-241 และ Pu-238 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์โดยทั่วไป ประกอบด้วยหัววัดรังสี (detector) ส่วนสร้างสัญญาณ (preamplifier) ส่วนขยายสัญญาณ (amplifier) ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ (multichannel analyzer) หรือ MCA ประกอบกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมประมวลผลและแสดงผลการวิเคราะห์



ภาพที่ 2.32 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์



รูปที่ 2.33 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จำเพาะของธาตุ



รูปที่ 2.34 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จำเพาะของธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียม

รังสีเอกซ์พลังงานสูงจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไอโซโทปหรือหลอดรังสีเอกซ์ ที่ตกกระทบตัวอย่าง จะทำให้ธาตุที่อยู่ภายในตัวอย่างปลดปล่อยรังสีเอกซ์จำเพาะของแต่ละธาตุออกมา ซึ่งแสดงผลการวัดเป็นแถบพลังงาน หรือสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตำแหน่งที่แสดงผลการวัดรังสีเอกซ์ของแต่ละธาตุ เรียกว่า โฟโตพีค (photopeak) ซึ่งมีพื้นที่ของพีค (peak area) เป็นค่านับวัด (count) ของรังสีเอกซ์ ที่มีค่าแปรผันตามปริมาณธาตุ

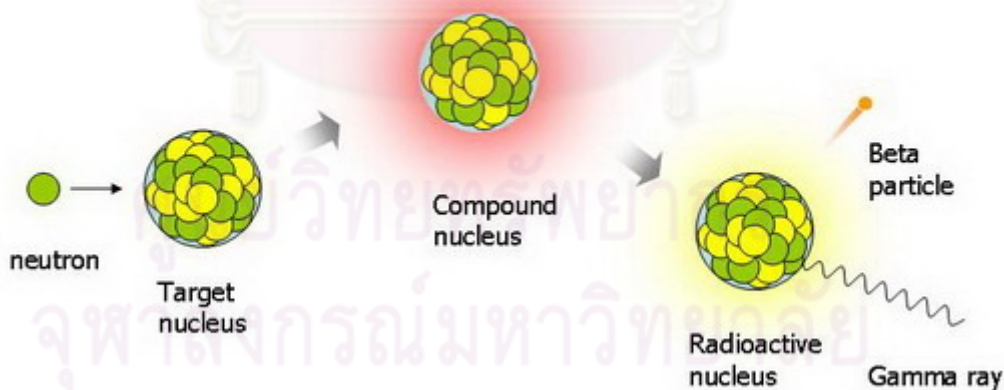
2.11 การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน

(<http://www.nst.or.th/article/article5001/article5001i.htm>, 2008)

การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุ และปริมาณธาตุ ในตัวอย่าง โดยการทำให้ไอโซโทปเสถียร กลายเป็นไอโซโทปรังสี ซึ่งจะสลายตัวกลับเป็นไอโซโทปเสถียร โดยการปลดปล่อยรังสีที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละไอโซโทปออกมา

ตัวอย่างที่อาบนิวตรอน (Neutron irradiation) จะทำให้นิวเคลียสของธาตุในตัวอย่าง ดูดกลืนนิวตรอน แล้วกลายเป็นสารกัมมันตรังสี เรียกว่า นิวไคลด์รังสี (radionuclide) หรือ ไอโซโทปรังสี (radioisotope) ซึ่งมีการสลายตัว โดยปลดปล่อยรังสีอัลฟา รังสีบีตา หรือรังสีแกมมา ที่มีพลังงานของรังสี และครึ่งชีวิตของไอโซโทปที่เป็นค่าจำเพาะ

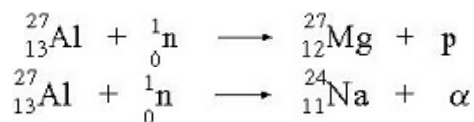
ในการอาบนิวตรอน ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ เกิดขึ้นระหว่างนิวเคลียสของธาตุ กับนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ หรือเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) เรียกว่า ปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (neutron capture gamma ray) ซึ่งนิวเคลียสจะดูดกลืนนิวตรอน แล้วปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,g) ตัวอย่างปฏิกิริยาระหว่างอลูมิเนียมกับนิวตรอน ได้แก่ ปฏิกิริยา $Al-27(n,g)Al-28$



รูปที่ 2.35 ปฏิกิริยา neutron capture gamma ray



นิวตรอนพลังงานสูงหรือฟาสต์นิวตรอน (fast neutron) เมื่อทำปฏิกิริยาแล้ว นิวเคลียสจะปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมา เรียกว่า ปฏิกิริยา (n,a) หรือปลดปล่อยโปรตอน เรียกว่า ปฏิกิริยา (n,p) ตัวอย่างได้แก่ ปฏิกิริยา $Al-27(n,p)Mg-27$ และปฏิกิริยา $Al-27(n,a)Na-24$



เมื่อตัวอย่างได้รับนิวตรอน อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Activation rate: A) จะแปรผันตาม ความเข้ม หรือฟลักซ์ของนิวตรอน (neutron flux: f) จำนวนนิวเคลียสของธาตุ (target nuclide: N) และครอสเซกชัน (cross section: s) ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ในการเกิดปฏิกิริยา ระหว่างนิวตรอนกับ นิวเคลียสของธาตุ โดยเป็นค่าคงที่สำหรับแต่ละนิวไคลด์ มีหน่วยเป็น บาร์น (barn) หรือ 10^{-24} cm^2

$$A = s f N$$

การวิเคราะห์โดยการอบนิวตรอน โดยทั่วไปจะทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ที่ทราบชนิดและปริมาณธาตุ เมื่ออบนิวตรอนสารตัวอย่างในลักษณะเดียวกับสารมาตรฐาน จะทำให้คำนวณปริมาณธาตุแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ได้จากการวัดกัมมันตภาพรังสี ตามสมการ

$$N_{\text{sample}} = \frac{N_{\text{std}} (A_{\text{sample}})}{(A_{\text{std}})}$$

$$N_{\text{sample}} = \text{ปริมาณธาตุในตัวอย่าง}$$

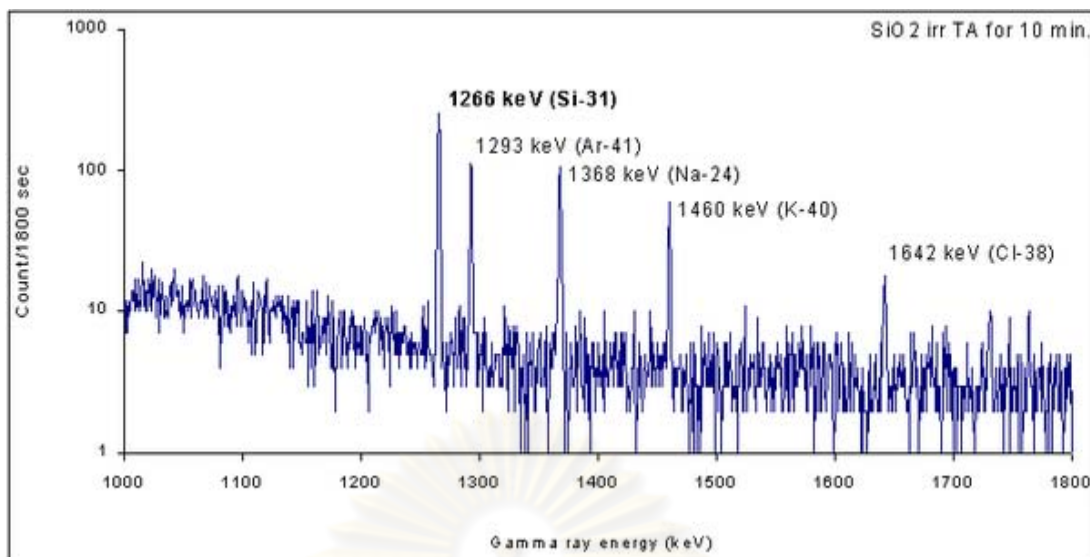
$$N_{\text{std}} = \text{ปริมาณธาตุในสารมาตรฐาน}$$

$$A_{\text{sample}} = \text{กัมมันตภาพรังสีของตัวอย่าง}$$

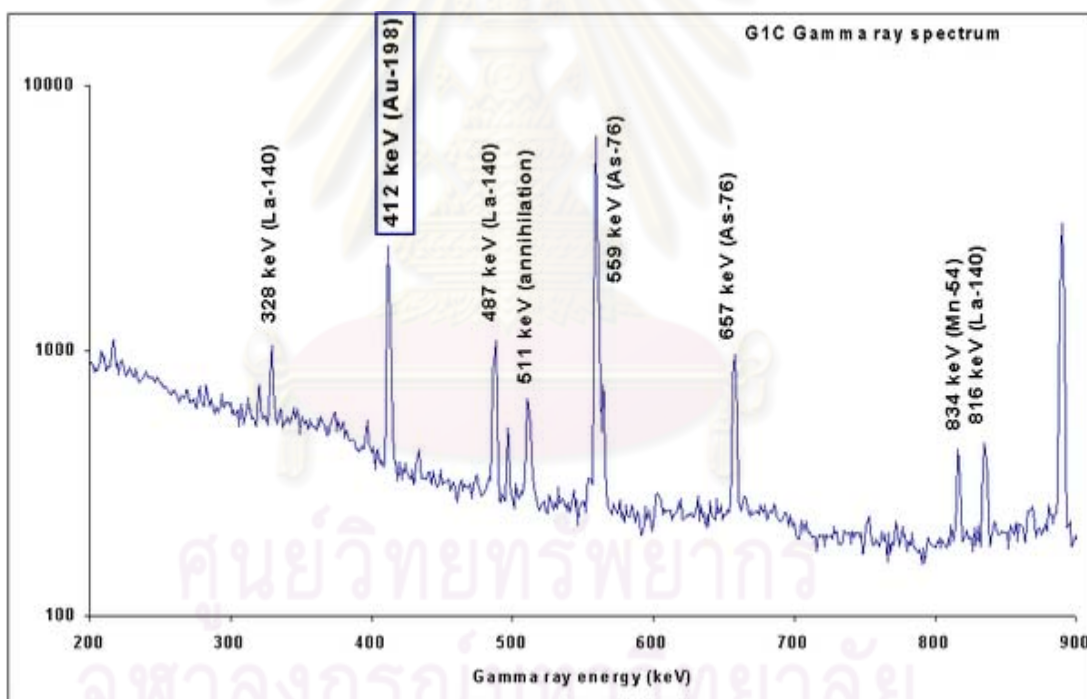
$$A_{\text{std}} = \text{กัมมันตภาพรังสีของสารมาตรฐาน}$$

ไอโซโทปรังสีส่วนใหญ่ สลายตัวโดยการปลดปล่อยทั้งรังสีบีตา และรังสีแกมมา แต่การวิเคราะห์โดยทั่วไป จะวัดกัมมันตภาพจากรังสีแกมมา เนื่องจากทำได้สะดวกและให้ความแม่นยำสูง โดยใช้ระบบวัดรังสีที่มีกำลังแยกสูง (high resolution) เช่น หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำ (semiconductor detector) ซึ่งได้ผลเป็นค่านับวัด (count) ของแถบต่อเนื่องของพลังงานรังสีแกมมา เรียกว่า สเปกตรัมรังสีแกมมา (gamma ray spectrum)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.36 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างซิลิกอนออกไซด์อาบนิวตรอน



รูปที่ 2.37 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างหินที่มีแร่ทองคำอาบนิวตรอน

สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการสลายตัวของไอโซโทปรังสีในตัวอย่าง สามารถนำมาระบุชนิดของธาตุได้ โดยการเทียบกับข้อมูลในคู่มือตารางนิวไคลด์ ซึ่งแสดงชนิดของไอโซโทปรังสีพลังงานรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมา และครึ่งชีวิตของไอโซโทป ดังรูปตัวอย่าง

ธาตุ	ไอโซโทปรังสี	ครึ่งชีวิต	พลังงานรังสีแกมมา (keV)
Sodium	Na-24	14.57 h	1368.6, 2754.0
Magnesium	Mg-27	9.46 min.	843.8, 1014.4
Aluminium	Al-28	2.24 min.	1779.0
Chlorine	Cl-38	37.2 min.	1642.1, 2167.7
Potassium	K-42	12.4 h	1524.6
Calcium	Ca-49	8.72 min.	3084.5
Vanadium	V-52	3.75 min.	1434.1
Chromium	Cr-51	27.70 d	320.1
Manganese	Mn-56	2.578 h	846.8, 1810.8, 2113.2
Iron	Fe-59	44.5 d	1099.3, 1291.6
Cobalt	Co-60	5.27 y	1173.2, 1332.5
Copper	Cu-64	12.70 h	1345.8
Arsenic	As-76	16.3 h	559.1, 657.1
Bromine	Br-82	35.3 h	616.9, 665.94
Silver	Ag-110m	250 d	657.8, 763.9, 884.7, 937.5, 1384.3
Lanthanum	La-140	40.3 h	328.8, 487.0, 815.8, 1596.4
Europium	Eu-152	13.3 y	121.8, 344.3, 1408.0
Tungsten	W-187	23.9 h	72.0, 134.2, 479.5, 551.5, 618.3, 685.7, 772.9
Iridium	Ir-192	73.8 d	296.0, 308.5, 316.5, 468.0, 588.6, 604.4, 612.5
Gold	Au-198	2.69 d	411.8, 657.9

รูปที่ 2.38 รูปตัวอย่างพลังงานจากรังสีแกมมาที่ปล่อยออกมาจากธาตุไอโซโทปรังสี

การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีความไวสูง สามารถวิเคราะห์เพื่อหาธาตุที่มีปริมาณน้อย (Trace Element) ได้ดี ให้ความแม่นยำสูง จึงเป็นเทคนิคที่มีการนำมาประกอบกรวิเคราะห์ธาตุ ในสารมาตรฐานโดยทั่วไป การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน สามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ทำลายตัวอย่าง มีการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ในตัวอย่างหลายประเภท เช่น การวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในตัวอย่างทางธรณีวิทยา การวิเคราะห์ปริมาณธาตุเพื่อจัดกลุ่มตัวอย่างทางโบราณคดี การวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างทางการแพทย์ การเกษตร อุตสาหกรรม และทางด้านสิ่งแวดล้อม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.12 องค์ประกอบธาตุภายในของเพทายที่ส่งผลต่อสีเพทาย (Agilent ICP-MS Journal, 2550)

งานวิจัยจากเครื่อง Agilent ICP-MS Journal, Macquarie University, Australia: Oct 2007-Issue 32 ได้ทดสอบวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหน่วยppm ในเพทายโดยแบ่งแยกเป็นชนิดของสีและปริมาณของธาตุแบ่งตามตารางได้ดังนี้

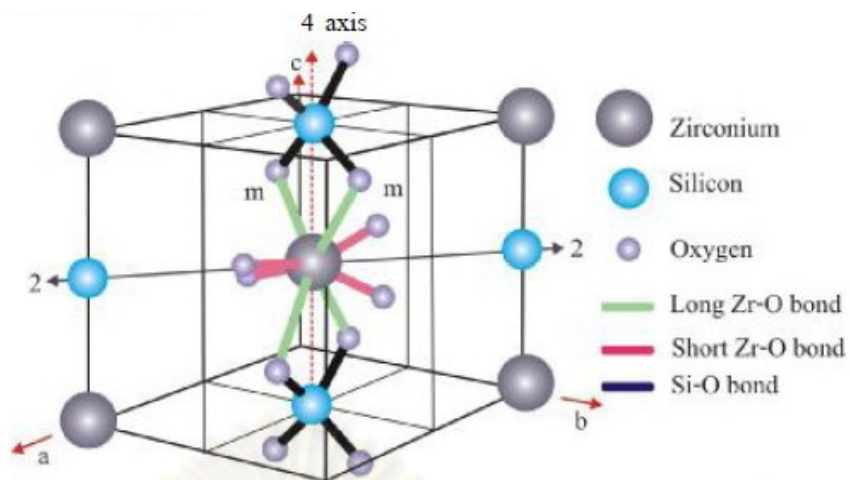
ตารางที่ 2.1 แสดงผลการหาปริมาณธาตุจาก Agilent ICP-MS

Color	Y	Ce	Yb	Lu	Hf*	Pb	Th	U
Red	267	20	71	13	7800	36	18	287
Yellow	287	15.3	72	14	4630	23	11	384
Brown	304	15.7	81	14	8310	21	10	398
Yellow-Pink	291	17	91	14	7890	25	11	355
Grey-Yellow	272	13	76	13	8225	17	8	381

ผลจากงานวิจัยวิเคราะห์สีขั้นพื้นฐานได้ว่าปริมาณของ Hf อาจจะมีผลต่อความแตกต่างของสีแดงและเหลืองของเพทาย

2.13 การศึกษาเบื้องต้นของการเปลี่ยนสีเพทายด้วยการเผา (อารยา มุ่งชำนาญกิจ, 2007)

เพทายหรือเซอร์คอนเป็นแร่ผลึก มีสูตรโครงสร้างหลักคือ $ZrSiO_4$ มีส่วนผสมกลุ่มพันธะของ SiO_4 tetrahedrons และ ZrO_8 dodecahedron ซึ่งเป็นพันธะผสมภายในชั้นโครงสร้างของเซอร์คอน โดย $ZrSiO_4$ ในรูปของผลึก tetragonal นั้นจะประกอบด้วย $ZrSiO_4$ 12 อะตอม กลุ่มพันธะผสม SiO_4^{-4} และ ZrO_8^{-12} เป็นพันธะภายในโครงสร้างเพทายสามารถเกิดขึ้นได้และลดลงได้ในขณะที่มีการเผาด้วยออกซิเจนหรือให้อุณหภูมิความร้อนจนพันธะกลุ่มทั้งสองมีการทำปฏิกิริยาเคมีดังรูป



รูปที่ 2.39 Portion of the Zircon unit cell showing interconnection of SiO_4 tetrahedrons and ZrO_8 dodecahedron along the 4 axis

งานวิจัยนี้ได้สรุปว่าเพทายเมื่อถูกเผาในบรรยากาศออกซิเจนแล้วสีน้ำตาลจะเป็นสีเหลือง อาจจะมีผลจากการเปลี่ยนแปลงของ SiO_4 tetrahedrons และ ZrO_8 dodecahedron ภายในชั้น โครงสร้างเพทาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kunz, 1968 กล่าวถึงสมบัติของเพทายโดยรวมคือ มีความแข็งประมาณ 7.5 ค่าความถ่วงจำเพาะ 4.7 หรืออาจอยู่ในช่วง 4.1-4.9 องค์ประกอบหลักประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และเซอร์โคเนียม (Zr) โดยจะมี SiO_2 33% และ Zr 67% และได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Gibbs พบ SiO_2 35.29%, Zr 63.33%, FeO_2 0.79% และความถ่วงจำเพาะ 4.7 (Gibbs) การศึกษาของ Wetherill พบเพทายสีช็อกโกแลต (chocolate) ประกอบด้วย SiO_2 34.07%, Zr 63.50%, FeO_2 2.02%, H_2O 0.50% และความถ่วงจำเพาะ 4.595 (Wetherill) การศึกษาของ Chandler พบ SiO_2 33.70%, Zr 65.30%, FeO_2 0.67%, H_2O 0.41% และความถ่วงจำเพาะ 4.607 (Chandler) และการศึกษาของ Koenig พบเพทายสีสนิม (iron black) ประกอบด้วย SiO_2 29.70%, Zr 60.98%, FeO_2 9.20%, Mg 0.30% และความถ่วงจำเพาะ 4.538 (Koenig, 1877)

Lodha และคณะ, 1989 ทำการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อย (trace elements) ที่มีเลขอะตอม สูงในหินแกรนิตจาก Kopra ของ Jammu and Kashmir โดยวิธี Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometer โดยวัดจากรังสีเอกซ์ชุด K ด้วยการกระตุ้นด้วยรังสีแกมมา 59.6 keV จาก ^{241}Am พบว่ามีปริมาณ Y 40-128 ppm, Zr 52-630 ppm, La 35-256 ppm, Ce 52-295 ppm และ Ba 21-328 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับหินแกรนิตจากแหล่ง Lohit ของ Arunachal Pradesh (Taylor, 1965) พบว่าปริมาณ Y, Zr, La และ Ce มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ Ba จาก Jammu and Kashmir มีปริมาณต่ำกว่า

Deer และคณะ, 1993 กล่าวถึงสมบัติของเพทายมีค่าความถ่วงจำเพาะ 4.6-4.7 ความแข็ง (hardness) 7.5 ระนาบของรูปแบบ (planes of a form) เป็น {110} ในชนิดคุณภาพสูงและในชนิดคุณภาพต่ำ สีแดงอมน้ำตาลสีเหลืองปนเทา สีเขียวใสไม่มีสี น้ำตาลหน่วยเซลล์ $a=6.61$ อังสตรอม และ $c = 5.99$ อังสตรอม สเปซกรุ๊ป (space group) $I4_1/amd$ การจัดเรียงตัวเป็นแบบ เทตระกอนนอล พบ Hf 1% มีอัตราส่วนระหว่าง Hf ต่อ Zr ประมาณ 0.02-0.04 และพบว่ามี Th และ U ปนอยู่ด้วย เพทายสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อถูกความร้อน และจะเปลี่ยนสีอย่างถาวรเมื่อถูก ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000-1,450 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Su และ Pan ที่ทำการศึกษารายละเอียดของเพทายจากแหล่งในประเทศจีนพบ SiO_2 31.45%, ZrO_2 64.03%, HfO_2 1.18%, TiO_2 0.04%, Al_2O_3 1.36%, FeO_2 0.09%, Na_2O 0.13%, MgO 0.04%, CaO 0.13%, ThO_2 0.01%, H_2O 0.17% และความถ่วงจำเพาะมีค่า 4.61 (Su และ Pan, 1973) ผลการศึกษารายละเอียดของเพทายสีแดงเข้มอมน้ำตาล (dark red-brown) จากทางเหนือของ Bergess, Ontario แคนาดาของ Palache และ Ellsworth พบ SiO_2 32.51%, $\text{ZrO}_2 + \text{HfO}_2 = 67.02\%$,

Al_2O_3 0.21%, FeO_2 0.08%, MgO 0.01%, CaO 0.22%, H_2O^+ 0.03% และความถ่วงจำเพาะ มีค่า 4.658

Palache และ Ellsworth, 1928 ผลการศึกษาองค์ประกอบธาตุในเพทายสีเขียวอมเทาถึง น้ำตาล (greyish green to brown) จาก Hayamadake, Fukushima ประเทศญี่ปุ่น พบ SiO_2 37.13%, $\text{ZrO}_2 + \text{HfO}_2$ 51.68%, Al_2O_3 0.48%, FeO_2 0.45%, ThO_2 1.03%, P_2O_5 3.37%, H_2O^+ 3.12%, H_2O^- 0.32% และความถ่วงจำเพาะมีค่า 3.957 (Hasegawa, 1957)

Baimonda และคณะ, 1994 ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วย XRF เพื่อศึกษาเปรียบเทียบลักษณะถ่าน หินจาก มองโกเลีย 5 แหล่งด้วยวิธีเชิงปริมาณ (quantitative method) วิธีการส่งผ่านทางรังสี (emission-transmission method) และวิธีพารามิเตอร์มูลฐาน (full fundamental parameter method) การศึกษาด้วยวิธีเชิงปริมาณพบ K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, W, Pb, U โดยถ่านหินสีน้ำตาลจากแหล่ง Baganur ไม่พบ K, As, W จากแหล่ง Aduunshuruun ไม่พบ W จากแหล่ง Sharyngol ไม่พบ Pb, U และถ่านหินสีดำจากแหล่ง Tavan-Tolgoi ไม่พบ K, As, Mo, W จากแหล่ง Nursthotgor ไม่พบ K, Ti, As, U ทำการวิเคราะห์ถ่านหินสีน้ำตาลจาก แหล่ง Baganur ปรากฏว่าทั้งสามวิธีพบ Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pb, U เหมือนกัน ยกเว้นวิธีพารามิเตอร์มูลฐานที่ไม่พบ Mo และเมื่อวิเคราะห์ถ่านหินสีดำจาก Tavan-Tolgoi พบ Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pb, Th, U โดยวิธีเชิงปริมาณ ไม่พบ Br และวิธี พารามิเตอร์มูลฐานไม่พบ Br, Mo เมื่อตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุพบว่า เป็นไปในแนวทาง เดียวกันทั้งสามวิธี ยกเว้นถ่านหินสีดำจากแหล่ง Tavan-Tilgoi พบ Sr 270 ppm และ Br 310 ppm มี ปริมาณมากกว่าแหล่งอื่น ส่วนถ่านหินสีดำจาก Nursthotgor พบ Sr 77 ppm และ Br 9 ppm มี ปริมาณน้อยกว่าแหล่งอื่น

Ratner และ Vernetson, 1995 ศึกษาเทคนิค NAA โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์จาก The University of Florida Training Reactor (UFTR) ด้วยวิธี Parametric, การเปรียบเทียบ (comparative) และ k_0 -standardization ใช้สารอ้างอิงมาตรฐาน 3 ตัวอย่าง คือ SRM 1577a (Bovine Liver) SRM 2704 (Buffalo River Sediment) ของ National Institute of Standards and Technology และ BHVO-1 (Hawaiian Basalt Rock) ของ The United States Geological Survey โดยมี กระบวนการดังนี้คือ การอาบรังสี (irradiation) ปล่อยให้ไอโซโทปรังสีสลายตัว (decay) และการ นับรังสี (counting) ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 51 ตัวอย่าง พบว่าองค์ประกอบธาตุที่พบมีปริมาณ ใกล้เคียงกับใบรับรองสารอ้างอิงมาตรฐาน (The Certified Reference Material) แต่อย่างไรก็ตาม ธาตุบางชนิดก็ไม่สามารถหาได้ตามใบรับรอง และยังมีธาตุบางชนิดที่หาได้แต่ไม่พบในใบรับรอง เช่นกัน ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 10%

รศ.ดร.กาญจนา ชูครุงศ์, 2545 การประเมินค่าและราคาอัญมณี, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อธิบายวิเคราะห์ การเทียบสี ประเมินค่าสีจาก Hue, Tone และ saturate ของพลอย

อาทร สกุลวรวิจิ, 2545 ศึกษาหาธาตุปริมาณน้อยในเพทายด้วยเทคนิคนิวเคลียร์ ทำการวิเคราะห์
เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเพทายจากแหล่งที่มาต่างๆ ด้วยวิธีว
รังสีเอกซ์และการอาบรังสีนิวตรอน จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์พบว่ามีธาตุปริมาณน้อย
ในระดับ ppm ในเพทายคือ Al Si Sc Fe Y La Tb Dy Er Yb Hf Au Th และ U

วัลลภ บุญคง, อารีรัตน์ คอนดองแก้ว, 2548 พูดถึงการนำพลอยมาฉายรังสีแกมมาทำให้เกิดการ
เปลี่ยนแปลงสี โดยเฉพาะเพทายเมื่อฉายรังสีแกมมาแล้วจะให้เป็นสีแดงและสีไม่จาง

Thaigoodview, 2551 อธิบายถึงการเกิดสี ที่มาของสี และองค์ประกอบของสี

Prac, 2551 อธิบายถึงทฤษฎีการเกิดแสงสี องค์ประกอบของแสงสี และความยาวของคลื่นแสงที่มี
ผลต่อการเกิดเสปกตรัมของแสง ทำให้เกิดสี

บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, 2550 กล่าวถึงทฤษฎีการเปลี่ยนสีของพลอยต่างๆ
เช่น HCC และ ECC, การแลกเปลี่ยนประจุ และธาตุปริมาณน้อยบางตัวที่เกี่ยวข้องกับ สีของ
พลอยชนิดนั้นๆ การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีวรังสีเอกซ์ และ การวิเคราะห์ด้วยวิธีอาบรังสีนิวตรอน

Agilent ICP-MS Journal, 2550 ได้ทดสอบวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหน่วย ppm ในเพทายโดย
แบ่งแยกเป็นชนิดของสีและปริมาณของธาตุจากการทดลองที่ได้พบว่า ปริมาณของฮาฟเนียมใน
เพทายสีเหลืองและสีแดงมีปริมาณธาตุที่แตกต่างกันมีผลทำให้สามารถสันนิษฐานได้ว่าปริมาณ
ของฮาฟเนียมนั้นมีผลต่อการเปลี่ยนสีของเพทาย

อารยา มุ่งชำนาญกิจ, 2550 การศึกษาเบื้องต้นของการเปลี่ยนสีเพทายด้วยการเผา เพทายหรือ
เซอร์คอนเป็นแท่งผลึก มีสูตรโครงสร้างหลักคือ $ZrSiO_4$ มีส่วนผสมกลุ่มพันธะของ SiO_4
tetrahedrons และ ZrO_8 dodecahedron ซึ่งเป็นพันธะผสมภายในชั้นโครงสร้างของเซอร์คอน
โดย $ZrSiO_4$ ในรูปของผลึก tetragonal นั้นจะประกอบด้วย $ZrSiO_4$ 12 อะตอม กลุ่มพันธะผสม
 SiO_4^{-4} และ ZrO_8^{-12} เป็นพันธะภายในโครงสร้างเพทายสามารถเกิดขึ้นได้และลดลงได้ในขณะที่มี
การเผาด้วยออกซิเจนหรือให้อุณหภูมิความร้อนจนพันธะกลุ่มทั้งสองมีการทำปฏิกิริยาเคมี

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดมีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของสีจากการเกิดปฏิกิริยาทั้งรีดักชันและออกซิเดชัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การให้ความร้อนกับเพทายและคัดเลือกเพทายที่ให้ความร้อนแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนสี

3.1.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.1.1.1 เต้าเผาแบบท่อทำด้วย Mullite (ยี่ห้อ Carbolite)

3.1.1.2 ภาชนะทำด้วยเซรามิก (ceramic boat) สำหรับบรรจุเพทายตัวอย่าง

3.1.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.2.1 นำเพทายที่ได้มาใส่ภาชนะบรรจุแล้วใส่บรรจุเข้าไปในท่อให้ความร้อน

3.1.2.2 ปรับค่าอุณหภูมิของเตา พร้อมกับปล่อยแก๊สออกซิเจน (Oxidation) เข้าเพื่อให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 1,000 องศาเซลเซียส ภายใน 4 ชั่วโมง

3.1.2.3 นำเพทายที่ให้ความร้อนเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่าอุณหภูมิตั้ง 30 องศาเซลเซียสแล้วทำการแยกเพทายที่หุงไม่เปลี่ยนสีและหุงเปลี่ยนสีอาจจะเป็นสีขาวใสหรือมีสีอื่นออกจากรัน

3.2 การฉายรังสีแกมมาให้กับเพทายที่ให้ความร้อนแล้วไม่เปลี่ยนสี

3.2.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.2.1.1 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากเครื่องฉายรังสีแกมมาจาก Co-60 Gamma cell 220 excel สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ อัตราปริมาณรังสีแกมมาประมาณ 10 kGy ต่อชั่วโมง

3.2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.2.2.1 นำเพทายที่หุงไม่เปลี่ยนสี บรรจุในเครื่องฉายรังสีแกมมา

3.2.2.2 ปรับระดับเวลา ที่ต้องใช้ในการให้ปริมาณรังสีแกมมาต่อตัวอย่าง เพทาย 200 kGy ใช้ 20 ชั่วโมงในการฉายรังสี เพทาย 400 kGy ใช้ 40 ชั่วโมงในการฉายรังสี เพทาย 600 kGy ใช้ 60 ชั่วโมงในการฉายรังสี เพทาย 800 kGy ใช้ 80 ชั่วโมงในการฉายรังสี และ เพทาย 1,000 kGy ใช้ 100 ชั่วโมงในการฉายรังสี



รูปที่ 3.1 เครื่องฉายรังสีแกมมาจาก Co-60 Gamma cell 220 excel สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

3.3 การประเมินสีของเพทายหลังจากผ่านการฉายรังสีแกมมา

3.3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.3.1.1 แผ่นประเมินเทียบสีระบบ Munsell ตามมาตรฐาน GIA

3.3.1.2 หลอดฟลูออเรสเซนต์สีขาวเพื่อส่องประเมินค่าสี

3.3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.2.1 นำเพทายตัวอย่างนำมาส่องด้วยหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ที่ให้หลอดอุณหภูมิ 5500 k เพื่อทดสอบการจางสี

3.3.2.2 เทียบกับแผ่นประเมินสีระบบ Munsell ดูค่าระดับ สี, ความสว่าง และ ความบริสุทธิ์ของสี

3.3.2.3 ทำการประเมินค่าที่ได้ลงในแผ่นบันทึกโน้ตบุ้ค

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างพหุองค์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (อาทร สกุลวรวิจ, 2545)

3.4.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.4.1.1 ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ของ JEOL รุ่น JSM-6400 SCANNING MICROSCOPE

3.4.1.2 หน่วยวิเคราะห์ผล (analysis unit) โดยใช้หัววัดรังสีแบบสารกึ่ง ตัวนำชนิดซิลิกอนบริสุทธิ์สูง (High-Purity Silicon) ของ XEROPHY

3.4.1.3 ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ทำหน้าที่ช่วยให้ตัวอย่างถูกเก็บไว้ในระบบ สุญญากาศภายในหน่วยวิเคราะห์ผล

3.4.1.4 กระบวนการจัดการข้อมูล (data processor) ทำหน้าที่จัดการกับสัญญาณ (signals) ที่วัดได้

3.4.1.6 ระบบประมวลผลข้อมูลประกอบด้วยคอมพิวเตอร์และโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัม JSM-6400 SCANNING MICROSCOPE

3.4.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.4.2.1 ติดตั้งอุปกรณ์ชุดเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

3.4.2.2 ติดตั้งโปรแกรมวิเคราะห์ผล

3.4.2.3 ทำการปรับเทียบและคาลิเบรตส์ เครื่องก่อนการใช้

3.4.2.4 นำพหุองค์ตัวอย่างใส่ในภาชนะบรรจุ (sample cell) ที่ผลิตจากฟลูออโรคาร์บอนพอลิเมอร์ (fluorocarbon polymer) โดยมีแผ่นเซลล์วินโดว์ (cell window) รองอยู่ จากนั้นนำภาชนะที่บรรจุพหุองค์ตัวอย่างวางในหน่วยวิเคราะห์ผลบริเวณช่องสำหรับวางตัวอย่าง (sample chamber)

3.4.2.5 ใช้คำสั่งอัตโนมัติในการกระตุ้นตัวอย่างด้วยความต่างศักย์ 5 กิโลโวลต์ (kV) และ 50 กิโลโวลต์ ภายใต้สภาพสุญญากาศ โดยใช้เวลา 10 นาที ทั้งนี้การวัดด้วยการให้ ความต่างศักย์ทั้ง 15 และ 50 กิโลโวลต์ เนื่องจากธาตุเบา (light element) จะวิเคราะห์ได้ดีที่ความ

ต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ เช่น โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) ส่วนธาตุหนัก (heavy element) จะวิเคราะห์ได้ดีที่ความต่างศักย์ 50 กิโลโวลต์ เช่น สแกนเดียม (Sc) ยูเรเนียม (U)

3.4.2.6 ผลที่ได้อยู่ในรูปสเปกตรัมแสดงค่าพลังงานกับจำนวนนับ ให้โปรแกรมวิเคราะห์ผลของสเปกตรัมที่ได้ในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

3.4.2.7 นำค่าพลังงานที่ได้จากสเปกตรัมเทียบกับตารางผนวกที่ 1 เพื่อตรวจสอบการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Lodha และคณะ, 1989; Baimonda และคณะ, 1994; Muhlmeister และคณะ, 1998)

3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเพทายตัวอย่างด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน (อาทิสกุลวรกิจ, 2545)

3.5.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.5.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อการวิจัย ปปว-1/1 (Thai Research Reactor - 1 / Modification 1; TRR-1/M1)

3.5.1.2 แหล่งจ่ายไฟ (power supply) ของ Canberra Model 2100

3.5.1.3 แหล่งจ่ายไฟความต่างศักย์สูง (high voltage power supply) ของ Canberra Model 3106D

3.5.1.4 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์ของ Canberra Model GC 3018 ขนาดความต่างศักย์ +3500 โวลต์

3.5.1.5 แคปซูล (capsule) บรรจุตัวอย่างทำด้วยโพลีเอทิลีน (polyethylene vial)

3.5.1.6 ขวดบรรจุแคปซูล เพื่อใช้ในการอบรังสีภายในท่อของเครื่องปฏิกรณ์

3.5.1.7 เครื่องชั่ง METTLER TOLEDO รุ่น AX 205

3.4.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.4.2.1 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างและสารมาตรฐาน (Reference material) ใต้เครื่องชั่ง

3.4.2.2 ชั่งตัวอย่างพร้อมบรรจุในแคปซูลที่ได้จากพอลิเอธิลีน (polyethylene)

3.4.2.3 ปิดผนึกแคปซูลด้วยความร้อน

3.4.2.4 เตรียมสารอ้างอิง สารอ้างอิงที่ใช้มี 2 ชนิด คือ สารอ้างอิงมาตรฐาน Standard Reference Material 2709 San Joaquin Soil ของ NIST และสารอ้างอิงที่ผสมขึ้นจาก ZrO_2 , HfO_2 และ Dy_2O_3

3.4.2.5 ชั่งสารอ้างอิงมาตรฐานประมาณ 0.15 กรัม ลงในแคปซูล จำนวน 16 แคปซูล พร้อมปิดผนึกแคปซูล

3.4.2.6 เตรียมสารอ้างอิงผสม สารอ้างอิงผสมได้จากการพิจารณาปริมาณธาตุจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์โดยการประมาณ

3.4.2.7 ตรวจสอบชนิดของธาตุที่พบในเพทายตัวอย่างแต่ไม่พบ หรือพบในปริมาณน้อยกว่ามากในสารอ้างอิงมาตรฐาน เช่น Zr ในตัวอย่างพบประมาณ 60%มวล ขณะที่ในสารอ้างอิง มาตรฐานพบ 160 ppm ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับที่พบในตัวอย่าง Zr จึงเป็นธาตุหนึ่งที่ต้องทำการผสมในสารอ้างอิงผสม และนอกจาก Zr แล้วยังพบว่า Hf และ Dy มีปริมาณน้อยในสารอ้างอิงมาตรฐาน จึงเป็นธาตุอีกสองชนิดที่ต้องทำการผสม

3.4.2.8 เตรียมสารมาตรฐานที่มี Zr, Hf และ Dy ในที่นี้ใช้ ZrO_2 99.8 % , HfO_2 99.7% และ Dy_2O_3 99.9 % ซึ่งคาดว่าเป็นอีกธาตุหนึ่งที่จะทำการวิเคราะห์ได้

3.4.2.9 คำนวณสารเคมีที่จะใช้ โดยต้องกา $Zr \approx 69\%$, $Hf \approx 2.5\%$, $Dy \approx 1.5\%$ และมีมวลรวมประมาณ 0.13 กรัม (มวลรวมมีค่าใกล้เคียงกับมวลเพทายตัวอย่าง) โดยประมาณจากสมการ

$$\% X = \frac{m_{\text{total}} \cdot m_{\text{molecule}}}{m_X} \cdot 100 = m_{\text{compound}}$$

X คือ ชนิดของธาตุ

m_{total} คือ มวลรวม (≈ 0.13 g)

m_{molecule} คือ มวลโมเลกุล

m_X คือ มวลธาตุ X

M_{compound} คือ มวลสารประกอบ

3.4.2.10 ปิดผนึกแคปซูลพร้อมเขย่าแคปซูลจนสารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

3.4.2.11 กำหนดรหัสสารอ้างอิงมาตรฐานเป็น A1, A2, A3, B1, B2, B3 และสารอ้างอิงผสมเป็น S1, S2, S3... S6 โดยกำหนดให้ A เป็นกลุ่มเพทายหุงขึ้นสี B เป็นกลุ่มเพทายไม่ขึ้นสี

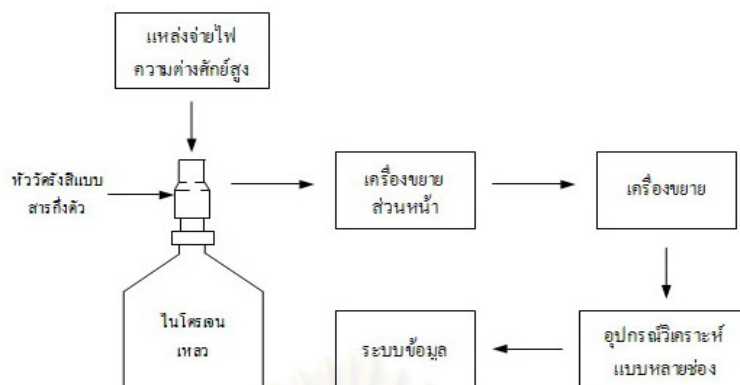
3.4.2.12 นำแคปซูลที่บรรจุเพทายตัวอย่างและสารอ้างอิงมาเรียงสลับ พร้อมทั้งบรรจุลงในขวด บรรจุแคปซูลสำหรับอาบนิวตรอน โดยใช้เพทายตัวอย่างเรียงในแท่งบรรจุชั้นที่ 1, 3 และ 5 ส่วนสารอ้างอิงเรียงติดไว้ในชั้นที่ 2 และ 4

3.4.2.13 นำขวดบรรจุแคปซูลที่มีตัวอย่างและสารอ้างอิงเข้าอาบนิวตรอนในแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเพื่อการวิจัย ปปว-1/1 ด้วยระยะเวลา และที่อาบนิวตรอนที่ต่างกัน

3.4.2.14 อาบเทอร์มอลนิวตรอนในท่อ TA เป็นเวลา 10 วินาที ทำการนับรังสีเป็นเวลาประมาณ 2 นาที ทำการวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้ทั้งของตัวอย่างและของสารอ้างอิง (Landsberger และ Wu, 1993)

3.4.2.15 อาบนิวตรอนเร็วในท่อ CA3 เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งให้สลายตัว 5 นาที นับรังสีเป็นเวลา 2 นาที ทำการวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้ (วิเชียร และคณะ, 2542)

3.4.2.16 วัดรังสีแกมมาติดตั้งอุปกรณ์ชุดหัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์ ดังภาพ



ภาพที่ 3.2 ชุดวิเคราะห์เครื่องวัดรังสีแกมมา

3.4.2.17 เปิดคอมพิวเตอร์ เรียกใช้โปรแกรม Genie 2000 ของ Canberra

3.4.2.18 เปิดสวิตซ์แหล่งจ่ายไฟ Canberra Model 2100 โดยสวิตซ์ของหัววัดรังสีแกมมา Canberra Model GC 3018 และเครื่องขยายส่วนหน้า Canberra Model 32002 CSL จะถูกเปิดเองโดยอัตโนมัติ

3.4.2.19 เปิดสวิตซ์เครื่องขยาย Canberra Model 2020

3.4.2.20 เปิดสวิตซ์แหล่งจ่ายไฟความต่างศักย์สูง Canberra Model 3106D พร้อมปรับความต่างศักย์เข้าไปที่ +3500 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนการวัด

3.4.2.21 ปรับเทียบพลังงาน (energy calibration) เนื่องด้วยภาคขยายสามารถปรับกำลังขยายได้ ทำให้สัญญาณขาออก (output) ที่เกิดขึ้น เปลี่ยนไป แม้ว่าสัญญาณขาเข้า (input) จะคงที่ ผลที่เกิดขึ้นคือตำแหน่งของพีคบนจอภาพจะเปลี่ยนไป นอกจากนี้ที่ระบบ ADC ยังสามารถปรับคอนเวอร์ชันเกน (conversion gain) ซึ่งเป็นตัวกำหนดสัญญาณดิจิทัลที่เกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกับการเปลี่ยนกำลังขยายจากเครื่องขยาย ดังนั้นในการใช้งานระบบวัดรังสีแกมมาจำเป็นต้องปรับเทียบค่าพลังงานกับหมายเลขช่องก่อนการใส่เสมอ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของพลังงานกับหมายเลขช่อง การปรับเทียบพลังงานในการวิจัยนี้ ได้ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานของ Amersham ที่ทราบค่าพลังงานคือ Co-60 และ Cs-137 ดังตารางที่ 2 โดยวาง Co-60 และ Cs-137 ไว้บริเวณช่องวางตัวอย่าง ทำการวัดค่าพลังงานจากโปรแกรม Genie 2000 ปรับเทียบพลังงาน และ ทำการวัดพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานซ้ำ

ตารางที่ 3.1 ค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่ใช้ในการเปรียบเทียบพลังงานและต้นกำเนิดรังสีแกมมา

ต้นกำเนิดรังสีแกมมา	พลังงาน (keV)
Cs-137	661.66
Co-60	1173.24 และ 1332.50

3.4.2.22 ในกรณีค่าพลังงานสูงสุดที่ได้ไม่เหมาะสม คือ มีค่าพลังงานมากเกินไปหรือน้อยเกินไป ให้ทำการปรับเกน (gain) ที่เครื่องขยาย แล้วทำการปรับเทียบใหม่ จนกระทั่งได้ค่าพลังงานสูงสุดที่เหมาะสม

3.4.2.23 การวิจัยนี้ใช้เกนหยาบ (coarse gain) เท่ากับ 10 และเกนละเอียด (fine gain) เท่ากับ 0.5

3.4.2.24 นำตัวอย่างและสารอ้างอิงที่ผ่านการอบรังสี พร้อมเงื่อนไขเวลาที่กำหนดเข้าทำการวัดรังสีแกมมา

3.5 การฉายแสงเพทายที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

3.5.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.5.1.1 หลอดไฟ 60 watt 220 volt

3.5.1.2 พัดลมตั้งโต๊ะ

3.5.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.5.2.1 นำตัวอย่างเพทายฉายรังสีปริมาณต่างๆกัน วางไว้ในห้องมืดแล้วเปิดหลอดไฟ 60 watt 220 volt ฉายแสงให้กับเพทาย

3.5.2.2 เปิดพัดลมเป่าหลอดไฟเพื่อระบายความร้อนตลอดเวลา

3.5.2.3 ฉายแสงจากหลอดไฟต่อเนื่องห่างจากตัวอย่างเพทายประมาณ 30 เซนติเมตรเป็นเวลา 12 วันแล้วนำตัวอย่างเพทายที่ฉายแสงไปทำการประเมินค่าสีจากแผ่นเทียบสี Munsell ตามมาตรฐาน GIA เพื่อวิเคราะห์หาความเปลี่ยนแปลงอีกครั้ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนสีของเพทายที่ไม่เปลี่ยนสีจากการหุงด้วยความร้อน โดยมีตัวแปรที่น่าสนใจ คือ

1. เงื่อนไขการนำเพทายมาจากแหล่งเดียวกันและขนาดใกล้เคียงกัน
2. เงื่อนไขการนำมาหุงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเท่าๆกันก่อนนำไปฉายแกมมา
3. ระดับปริมาณรังสีแกมมาฉายให้กับเพทายหุงไม่ขึ้นสี ที่ 200,400, 600,800 และ 1,000 kGy
4. ประเมินค่าเกรดสีตามแผ่นเทียบสี Munsell ตามมาตรฐาน GIA ของเพทายที่หุงไม่ขึ้นสี หุงขึ้นสีที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ก่อนนำเพทายหุงไม่ขึ้นสีไปหุงด้วยความร้อนที่ 1,000 องศาเซลเซียสอีกครั้ง
5. ประเมินค่าเกรดสีตามแผ่นเทียบสี Munsell ตามมาตรฐาน GIA หลังจากหุงด้วยความร้อนที่ 1,000 องศาเซลเซียส เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของเกรดสีที่เปลี่ยนแปลง
6. วิเคราะห์คุณสมบัติของเพทายที่หุงขึ้นสีและหุงไม่ขึ้นสี โดยการวิเคราะห์ทางคุณภาพและปริมาณของธาตุที่อาจจะมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนสีของเพทาย ด้วยวิธีการวาดด้วยรังสีเอกซ์
7. วิเคราะห์คุณสมบัติของเพทายที่หุงขึ้นสีและหุงไม่ขึ้นสี โดยการวิเคราะห์ทางคุณภาพและปริมาณของธาตุที่อาจจะมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนสีของเพทายด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน
8. กำหนดกลุ่มของตัวอย่างวิจัยแบ่งเป็น

เพทายหุงขึ้นสี	กลุ่ม A
เพทายหุงไม่ขึ้นสี	กลุ่ม B
เพทายไม่ผ่านการหุง	กลุ่ม C

4.1 ผลการประเมินค่าสีของเพทหายที่ทดสอบที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

4.1.1 ผลการวัดสีด้วยแผ่นเทียบสี Munsell ตามมาตรฐาน GIA

สมบัติค่าสี ได้แก่ สี (Hue) โทนสว่าง (Tone) และความบริสุทธิ์ของสี (Saturate) ของ

ตัวอย่างเพทหาย กำหนดตัวอย่างนำไปทำการวัดสี

ตัวอย่าง A1 ถึง A3 เป็นเพทหายที่หุงขึ้นสี 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่าง B1 ถึง B3 เป็นเพทหายที่หุงไม่ขึ้นสี 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่าง C1 ถึง C3 เป็นเพทหายไม่ผ่านการหุงด้วยความร้อน 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 200 kGy 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 400 kGy 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 600 kGy 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 800 kGy 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 1,000 kGy 3 ตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สมบัติค่าสีได้แก่ สี (Hue) โทนสว่าง (Tone) และความบริสุทธิ์ของสี (Saturate)

Code	Color	Hue	Tone	Saturate
200kGy -1	R	7.5	4	10
200kGy -2	R	10	6	8
200kGy -3	R	10	8	10
400kGy -1	R	2.5	6	8
400kGy -2	R	10	5	6
400kGy -3	R	10	5	8
600kGy -1	R	10	5	8
600kGy -2	YR	2.5	5	6
600kGy -3	R	10	4	12
800kGy -1	YR	2.5	7	6
800kGy -2	R	10	6	8
800kGy -3	R	10	5	12
1000kGy-1	R	10	5	10
1000 kGy-2	R	10	5	12
1000 kGy-3	YR	2.5	7	6
A1	Colorless	ND	ND	ND
A2	Colorless	ND	ND	ND
A3	Colorless	ND	ND	ND
B1	Y	2.5	8.5	4
B2	Y	5	8.5	2
B3	Y	2.5	8.5	2
C1	YR	5	9	4
C2	YR	10	5	2
C3	YR	7.5	2	2

ND = Not Detected

จากตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบสมบัติสี (Hue) โทนสว่าง (Tone) และความบริสุทธิ์ของสี (Saturate) จากเดิมเพท่ายก่อนทำการหุงด้วยความร้อน C1 ถึง C3 ประเมินค่าสีเดิมจะเป็นสีเหลืองแดง มีค่าสีระดับ 5-10 ค่า Tone แตกต่างกันไปตั้งแต่ 2 ถึง 9 และค่าบริสุทธิ์ของสีระดับที่ 2 ถึง 4

กลุ่มเพท่ายที่หุงขึ้นสีใส A1 ถึง A3 นั้นไม่สามารถตรวจสอบค่าคุณสมบัติต่างๆของสีได้ กลุ่มเพท่ายหุงไม่ขึ้นสีชุดที่ B1, B2 และ B3 พบว่าหลังจากนำไปฉายรังสีแกมมา ค่าสีเดิมที่เป็นสีเหลืองแดง ค่าโทนสว่าง 8.5 และความบริสุทธิ์ของสีที่ประมาณ 2-4 นั้น นั้นเปลี่ยนส่วนใหญ่เป็นสีแดงระดับสีมีค่า 10 มีบางตัวอย่างเป็นเหลืองผสมแดงระดับสีมีค่า 2.5 ค่าโทนสว่างกลับลดลงที่บแสงมากขึ้น และความบริสุทธิ์ของสีมากขึ้นจากเดิมทุกตัวอย่างประมาณที่ 6-12 ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบเพท่ายก่อนหุง และ หลังหุงไม่ขึ้นสี ค่าคุณสมบัติสีต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน

กลุ่มเพท่ายเมื่อฉายรังสีแกมมานั้นฉายที่ปริมาณรังสีต่างๆเปลี่ยนสีจากสีเหลืองแดงเป็นสีแดงส่วนมาก สามารถประเมินค่า Hue สูงขึ้นเกือบทุกตัวอย่าง ค่า Tone กลับมีค่าลดลง และ ค่า Saturate มีค่ามากขึ้น จากการประเมินค่าคุณสมบัติต่างๆของเพท่ายพบว่าที่ระดับ 200 kGy ถึง 1,000 kGy ผลจากการประเมินสีที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลการประเมินค่าการจางสีของเพทหายที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาแล้วและฉายแสงจาก Spot Light

4.2.1 ผลการวัดสีด้วยแผ่นเทียบสี Munsell ตามมาตรฐาน GIA

สมบัติค่าสี ได้แก่ สี (Hue) โทนสว่าง (Tone) และความบริสุทธิ์ของสี (Saturate) ของตัวอย่างเพทหายที่ฉายแกมมาแล้วนำมาฉายแสงด้วย Spot Light มีค่าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติค่าสี ได้แก่ สี (Hue) โทนสว่าง (Tone) และความบริสุทธิ์ของสี (Saturate) ของเพทหายที่ฉายแกมมาแล้วนำมาฉายแสงด้วย Spot Light

Code	Color	Hue	Tone	Saturate
200 kGy -1	R	7.5	5	10
200 kGy -2	R	10	6	8
200 kGy -3	R	10	8	6
400 kGy -1	YR	2.5	5	8
400 kGy -2	R	10	5	6
400 kGy -3	R	10	8	8
600 kGy -1	R	10	7	8
600 kGy -2	YR	2.5	8	6
600 kGy -3	R	10	5	10
800 kGy -1	YR	2.5	8	4
800 kGy -2	R	10	4	8
800 kGy -3	R	10	4	8
1000 kGy -1	R	10	5	12
1000 kGy -2	R	10	6	12
1000 kGy -3	YR	2.5	8	4

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบการจางสีของเพท่ายที่ฉายรังสีแกมมาแล้วหลังการฉายแสงจากหลอดไฟโดยเปรียบเทียบกับเพท่ายที่ฉายรังสีแกมมาแล้วแต่ไม่ได้ฉายแสงจากหลอดไฟ

Code	Color		Hue		Tone		Saturate	
	before	after	before	after	before	after	before	after
200 kGy -1	R	R	7.5	7.5	4	5	10	10
200 kGy -2	R	R	10	10	6	6	8	8
200 kGy -3	R	R	10	10	8	8	10	6
400 kGy -1	YR	R	2.5	2.5	6	5	8	8
400 kGy -2	R	R	10	10	5	5	6	6
400 kGy -3	R	R	10	10	5	8	8	8
600 kGy -1	R	R	10	10	5	7	8	8
600 kGy -2	YR	YR	2.5	2.5	5	8	6	6
600 kGy -3	R	R	10	10	4	5	12	10
800 kGy -1	YR	YR	2.5	2.5	7	8	6	4
800 kGy -2	R	R	10	10	6	4	8	8
800 kGy -3	R	R	10	10	5	4	12	8
1000 kGy 1	R	R	10	10	5	5	10	12
1000 kGy 2	R	R	10	10	5	6	12	12
1000 kGy 3	YR	YR	2.5	2.5	7	8	6	4

จากตารางที่ 4.3 กลุ่มเพท่ายในกลุ่มตัวอย่างผ่านการฉายรังสีแกมมาก่อนแล้วทำการผ่านการฉายแสงจากหลอดไฟ ผลการประเมินสีที่ได้ปรากฏว่า ค่าสีที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม ค่า Hue แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ค่า Tone นั้น บางส่วนจะมีค่ามากขึ้น และบางส่วนคงที่ ค่า saturate บางส่วนมีค่าลดลง และบางส่วนคงที่

ตารางที่ 4.4 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสี (สีไม่เปลี่ยน) โดยเทียบสีจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA

รหัส	เพทายที่หุงไม่ขึ้นสีด้วยความร้อน (สีไม่เปลี่ยน)	ค่าสีที่ได้จากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
B1		
B2		
B3		

ตารางที่ 4.5 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนขึ้นสีโดยเทียบสีจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA

รหัส

เพทายผ่านการหุงด้วยความร้อนขึ้นสีขาวใส

ค่าสีที่ได้จากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA

A1



Colorless

A2







Colorless

A3



Colorless

ตารางที่ 4.6 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วยังไม่ผ่านการหุงด้วยความร้อนโดยเทียบสีจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA

รหัส	เพทายไม่ผ่านการหุงด้วยความร้อน	ค่าสีที่ได้จากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
C-1		
C-2		
C-3		







ตารางที่ 4.7 สีของเพทหายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 200 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA

รหัส	เพทหายผ่านการฉายรังสีแกมมา	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
200 kGy-1		
200 kGy-2		
200 kGy-3		





ตารางที่ 4.8 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 400 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA

รหัส	เพทายผ่านการฉายรังสีแกมมา	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
400 kGy-1		
400 kGy-2		
400 kGy-3		


ตารางที่ 4.9 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 600 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA

รหัส	เพทายผ่านการฉายรังสีแกมมา	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
600 kGy-1		
600 kGy-2		
600 kGy-3		

ตารางที่ 4.10 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 800 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA

รหัส	เพทายผ่านการฉายรังสีแกมมา	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
800 kGy-1		
800 kGy-2		
800 kGy-3		






ตารางที่ 4.11 สีของเพทายที่เจียรนัยแล้วหุงด้วยความร้อนไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 1,000 kGy เทียบจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA

รหัส	เพทายผ่านการฉายรังสีแกมมา	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
1,000 kGy-1		
1,000 kGy-2		
1,000 kGy-3		

ตารางที่ 4.12 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 200 kGy และผ่านการฉายแสงจากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี

รหัส	เพทายผ่านการฉายรังสีแกมมาและส่องด้วยแสงไฟแล้ว	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
200 kGy-1		
200 kGy-2		
200 kGy-3		

ตารางที่ 4.13 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 400 kGy และผ่านการฉายแสงจากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี

รหัส	เพทายผ่านการฉายรังสีแกมมาและส่องด้วยแสงไฟแล้ว	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
400 kGy-1		
400 kGy-2		
400 kGy-3		







ตารางที่ 4.14 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 600 kGy และผ่านการฉายแสงจากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี

รหัส	เพทายผ่านการฉายรังสีแกมมาและส่องด้วยแสงไฟแล้ว	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
600 kGy-1		
600 kGy-2		
600 kGy-3		

ตารางที่ 4.15 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 800 kGy และผ่านการฉายแสงจากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี

รหัส	เพทายผ่านการฉายรังสีแกมมาและส่องด้วยแสงไฟแล้ว	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
800 kGy-1		
800 kGy-2		
800 kGy-3		

ตารางที่ 4.16 ตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 1,000 kGy และผ่านการฉายแสงจากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อทดสอบการจางสี

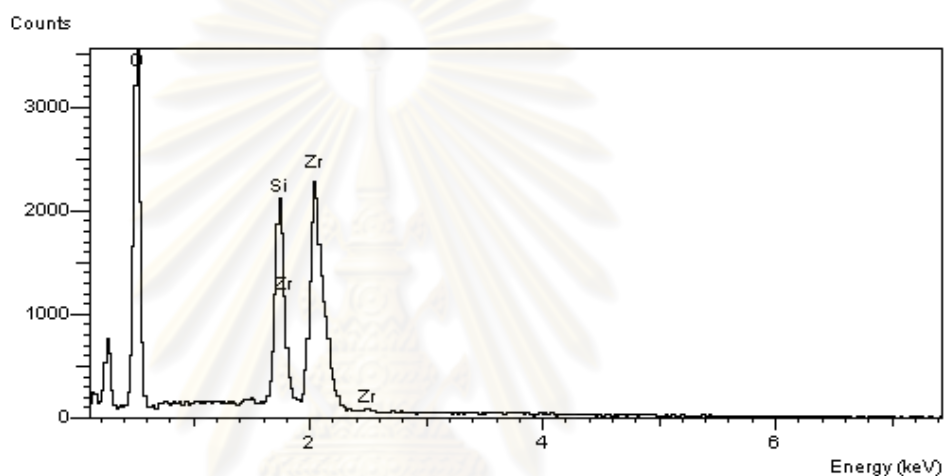
รหัส	เพทายผ่านการฉายรังสีแกมมาและส่องด้วยแสงไฟแล้ว	ค่าสีที่ได้จากจากแถบสี Munsell มาตรฐาน GIA
1,000 kGy-1		
1,000 kGy-2		
1,000 kGy-3		

ตารางที่ 4.17 สีของตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีแล้วฉายรังสีแกมมา 600 kGy ก่อนและหลังการฉายแสงจากหลอดไฟ 60 watt 220 volt เพื่อเปรียบเทียบการจางสี

รหัส	ก่อนฉายด้วยแสงไฟ	สีก่อนฉายแสงตาม Munsell	หลังฉายด้วยแสงไฟแล้ว	สีหลังฉายแสงตาม Munsell
600 kGy-1				
600 kGy-2				
600 kGy-3				

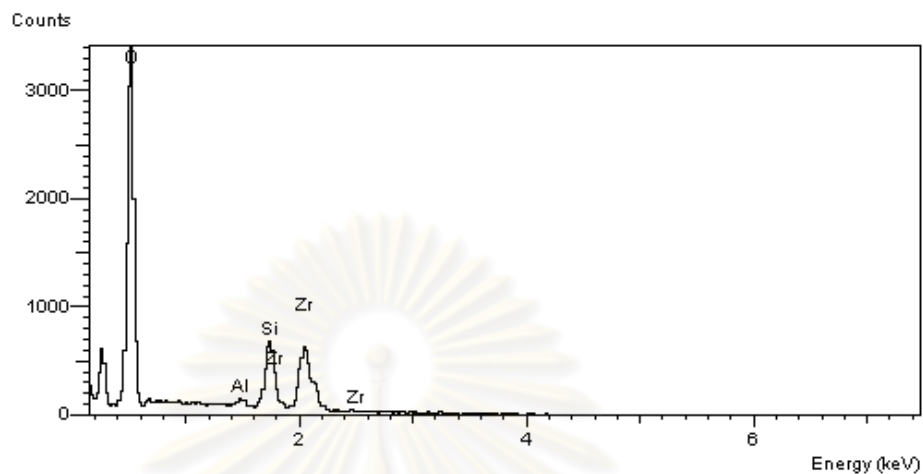
4.3 การหาปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

ผลการศึกษาปริมาณธาตุด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แสดงผลในรูปของสเปกตรัมของพลังงานกับการนับต่อเวลา 600 วินาทีและการวิเคราะห์ผลของสเปกตรัมในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม JSM-6400 โดยการวัดที่ผิวสามจุดต่อตัวอย่าง แบ่งเป็นตัวอย่างหุงขึ้นสี A1 ถึง A3 และหุงไม่ขึ้นสี B1 ถึง B3

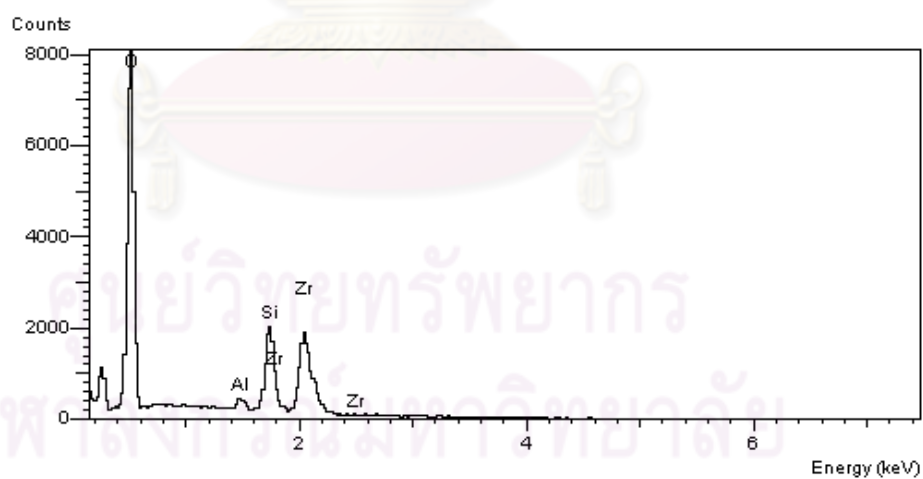


ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเพทายตัวอย่าง A1

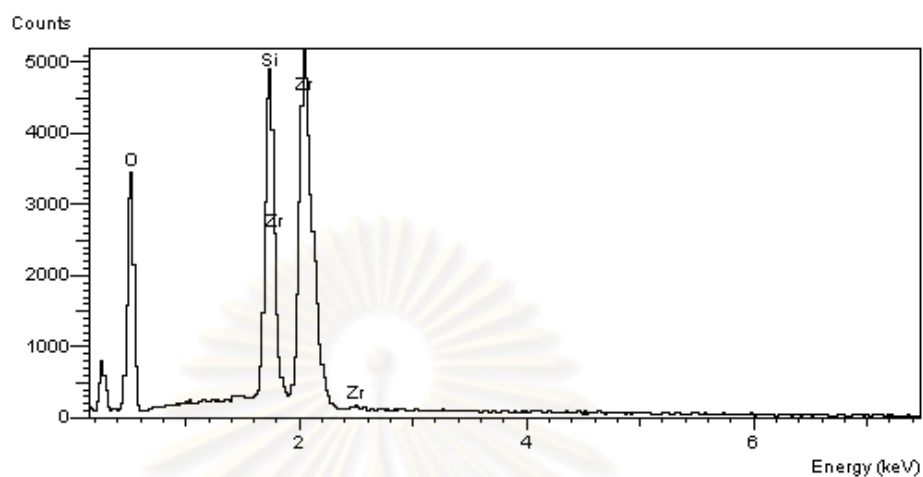
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



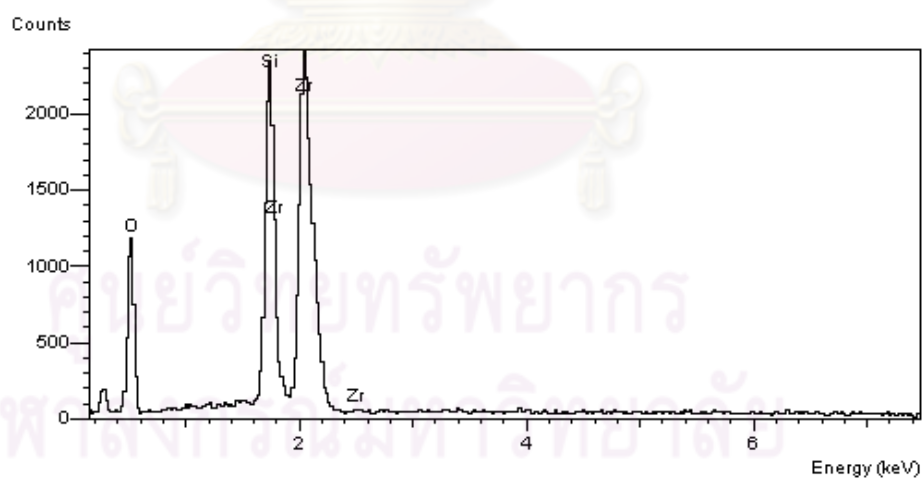
ภาพที่ 4.2 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเพทายตัวอย่าง A2



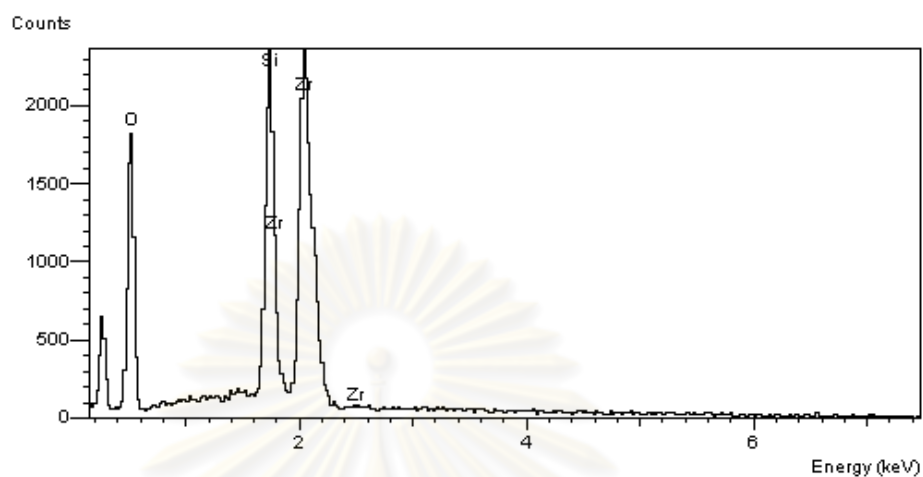
ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเพทายตัวอย่าง A3



ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเพทายตัวอย่าง B1



ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเพทายตัวอย่าง B2



ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเพทายตัวอย่าง B3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.18 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในพายุเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณด้วยวิธีเอกซเรย์

ฟลูออเรสเซนซ์

Code	Zr (%)	Si (%)	Al (%)	O (%)
A1	23.33	7.84	ND	68.42
A2	15.83	6.01	0.35	78.81
A3	14.88	5.64	0.64	79
B1	36.25	11.48	ND	51.32
B2	33.01	10.76	ND	55.43
B3	34.05	10.95	ND	55.41

ND = Not Detected

จากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเทียบเป็นอัตราส่วนร้อยละพบว่าตัวอย่างพายุหุงขึ้นสีนั้นมีส่วนองค์ประกอบของเซอร์โคเนียม (Zr) ในอัตราส่วนที่น้อยกว่าพายุหุงไม่ขึ้นสีเกือบสองเท่า ส่วนองค์ประกอบที่มีซิลิกอน (Si) อัตราส่วนพายุหุงขึ้นสีมีปริมาณที่น้อยกว่าเกือบหนึ่งเท่า องค์ประกอบที่เป็นอะลูมิเนียม (Al) ในพายุหุงขึ้นสีพบเล็กน้อยแต่ในพายุหุงไม่ขึ้นสีไม่พบ และองค์ประกอบที่เป็นออกซิเจน (O) ในพายุหุงขึ้นสีมีปริมาณมากกว่าพายุหุงไม่ขึ้นสี

4.4 ปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ด้วยการอาบรังสีนิวตรอน

มวลของพายุตัวอย่างและสารอ้างอิงจากการชั่งด้วยเครื่องชั่ง A1 ถึง A3 พายุกลุ่มที่หุงขึ้นสี

B1 ถึง B3 พายุกลุ่มที่หุงไม่ขึ้นสี

S1 ถึง S4 สารอ้างอิงผสม Dy_2O_3 , HfO_2 และ ZrO_2 ซึ่งสามารถทราบเปอร์เซ็นต์ของธาตุแต่ละชนิด

S5 ถึง S8 สารอ้างอิงมาตรฐานที่สามารถตรวจสอบองค์ประกอบธาตุได้จากใบรับรองสารอ้างอิงมาตรฐาน (Standard Reference Material 2709 San Joaquin Soil) ตามตารางผนวก

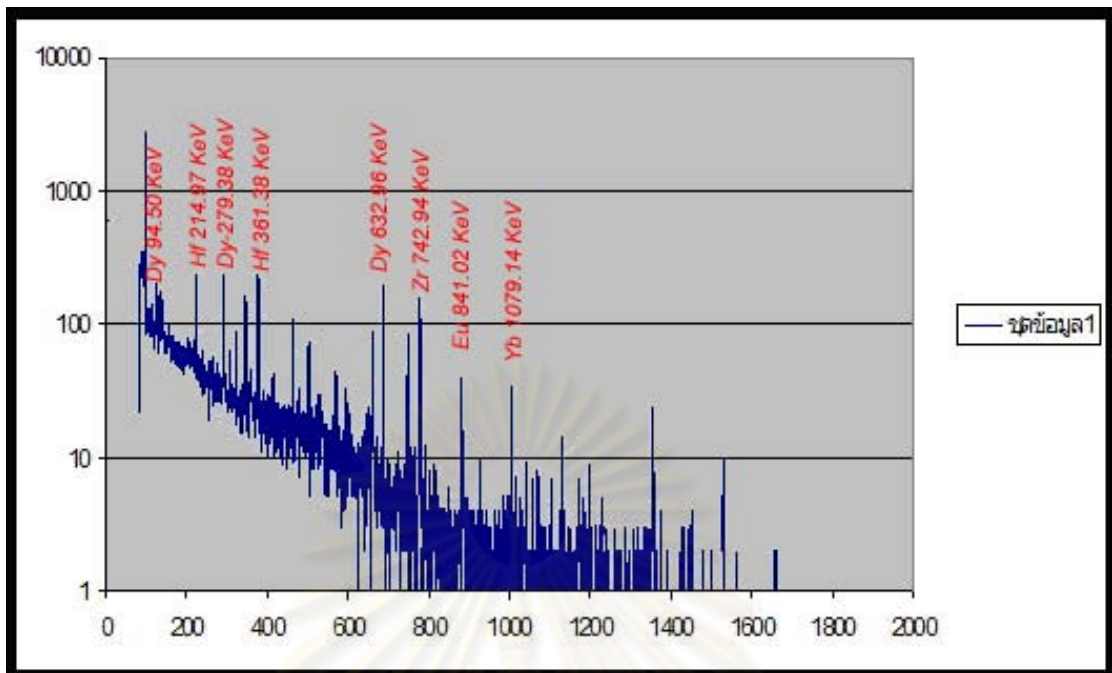
ตารางที่ 4.19 แสดงมวลของเพทายตัวอย่างและสารอ้างอิงมาตรฐานทั้งสองชนิด

รหัสตัวอย่าง และสารอ้างอิง	มวลทั้งหมด (กรัม)	Zr(กรัม)	Hf(กรัม)	Dy(กรัม)
A1	0.05095	ND	ND	ND
A2	0.05233	ND	ND	ND
A3	0.04454	ND	ND	ND
A4	0.04818	ND	ND	ND
A5	0.03032	ND	ND	ND
A6	0.02817	ND	ND	ND
B1	0.03821	ND	ND	ND
B2	0.03334	ND	ND	ND
B3	0.04424	ND	ND	ND
B4	0.04924	ND	ND	ND
B5	0.03557	ND	ND	ND
B6	0.03747	ND	ND	ND

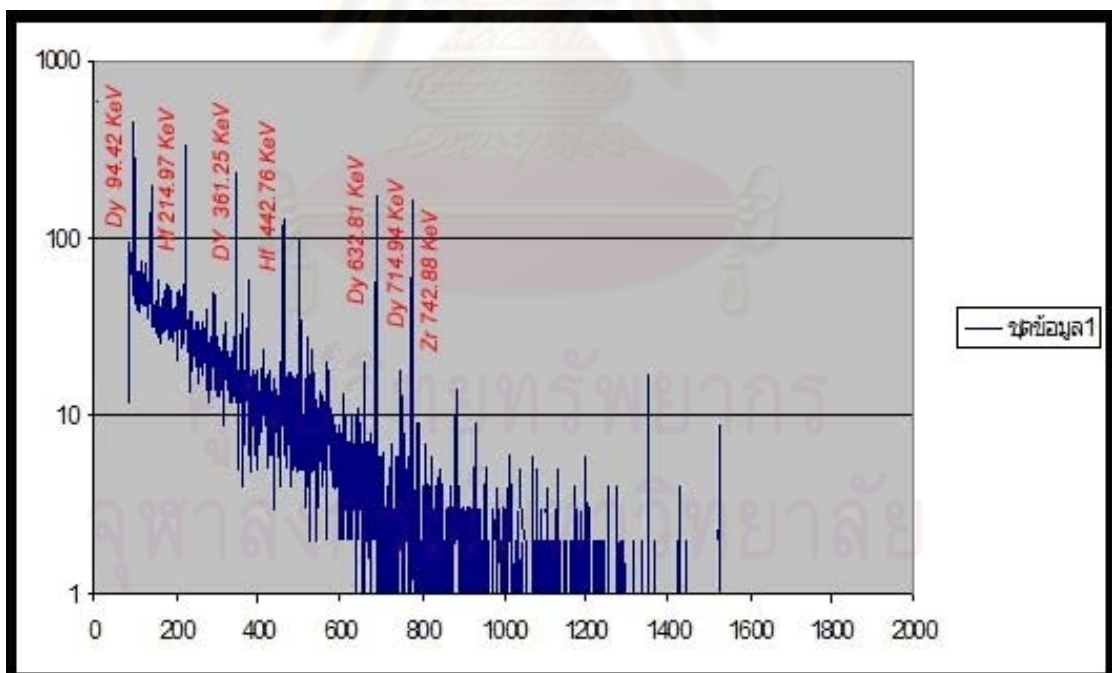
ND= Not Detected

จากผลของสเปกตรัมที่ได้ ดังภาพที่ ถึงภาพที่ พบองค์ประกอบธาตุจากปฏิกิริยา ดัง ตารางที่ (Landsberger และ Wu, 1993; ปานทิพย์ และอัจฉรา, 2543) โดยแกนแนวตั้งเป็นค่า พลังงานหน่วย keV และแกนแนวนอนเป็นช่วงช่องสัญญาณตั้งแต่ 1 ถึง 4,096

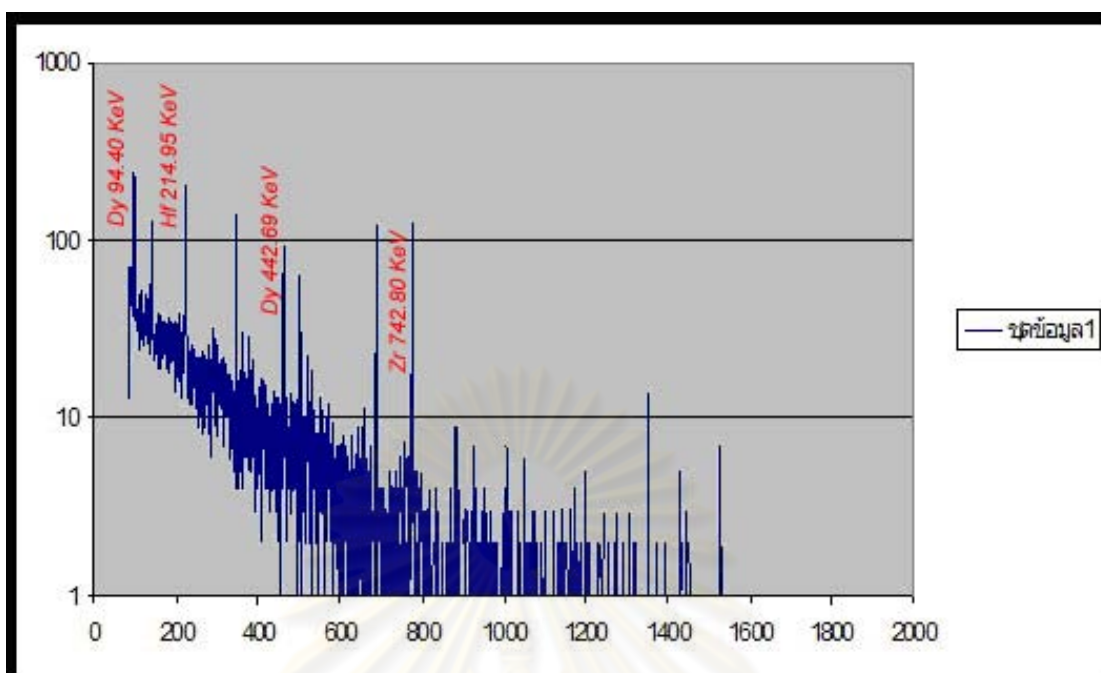
ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



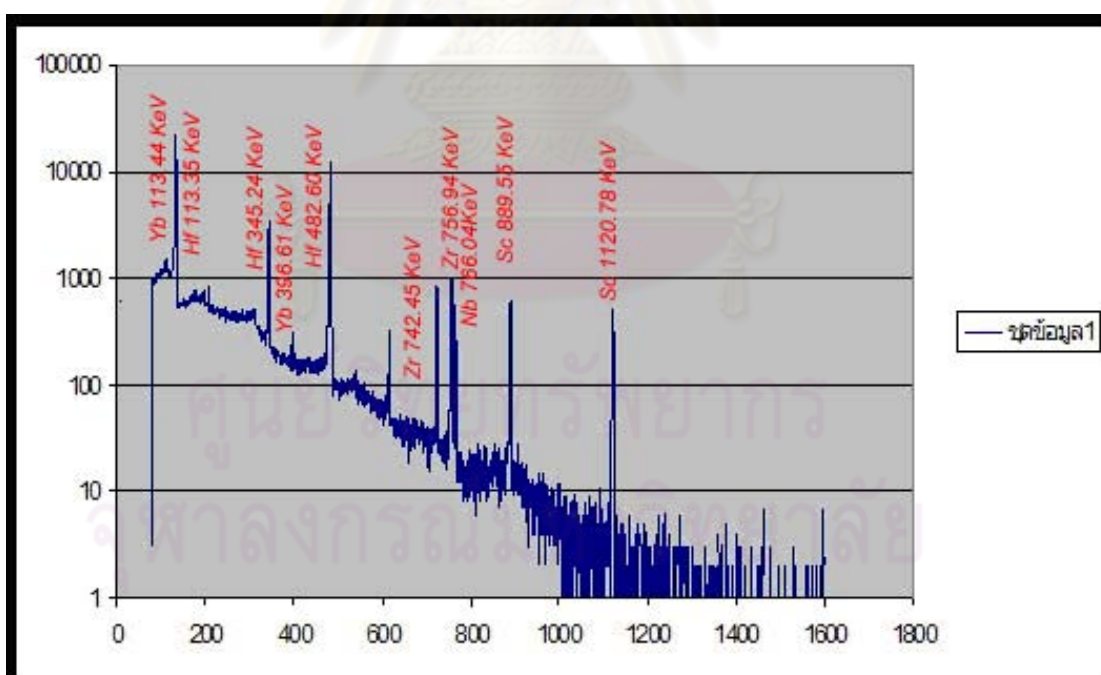
ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง A1



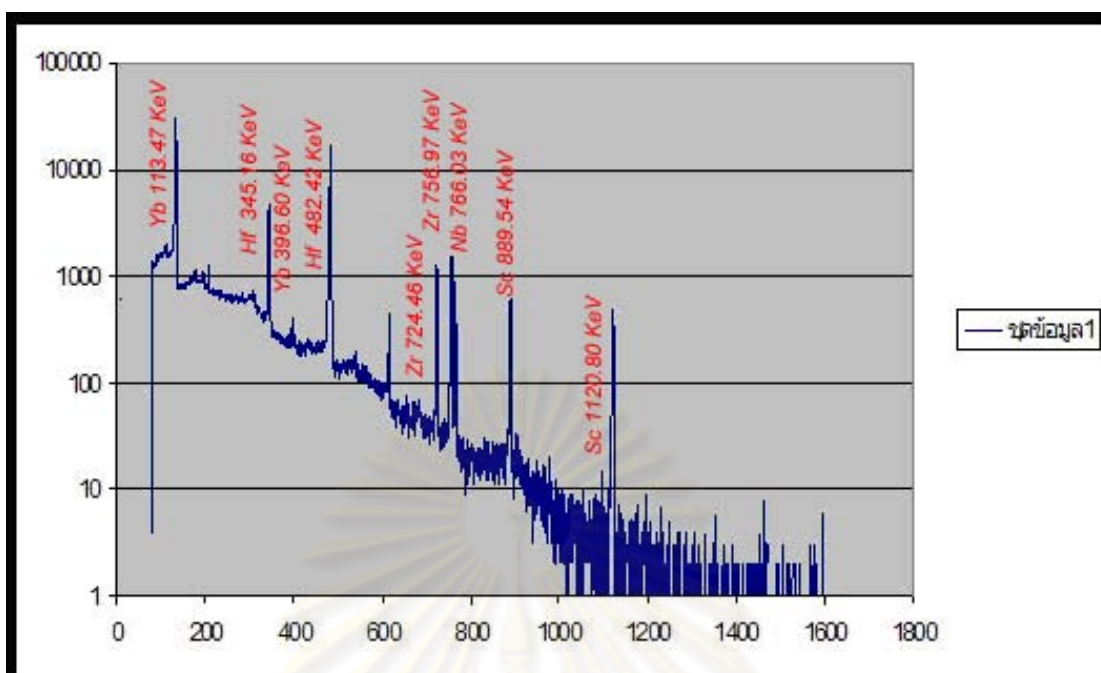
ภาพที่ 4.8 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง A2



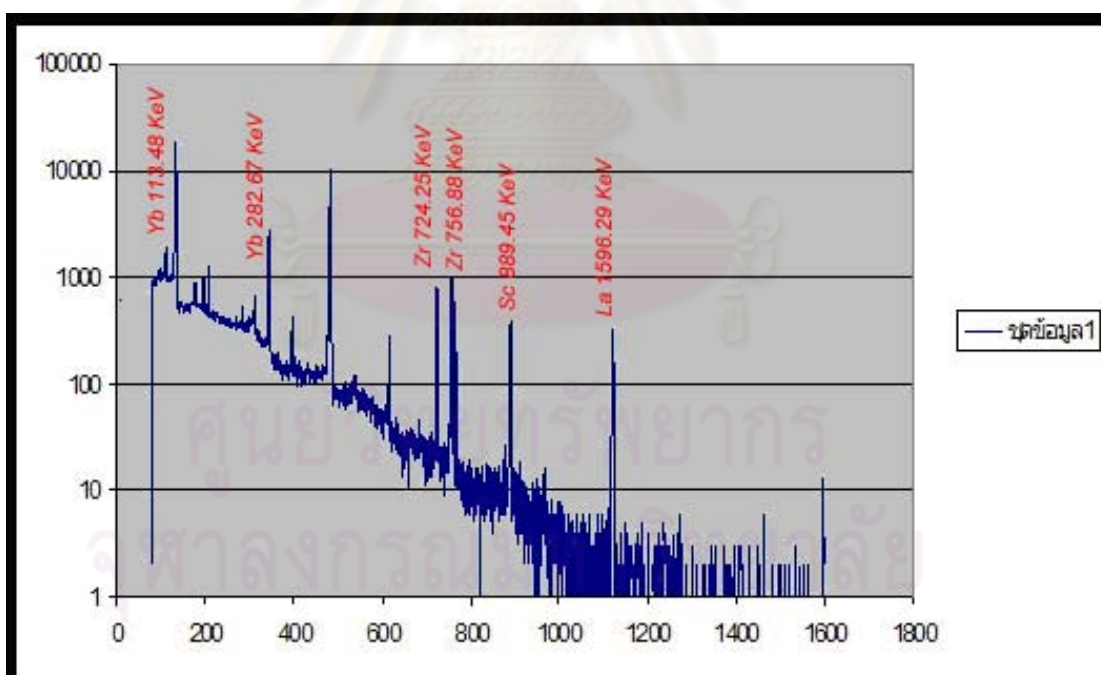
ภาพที่ 4.9 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง A3



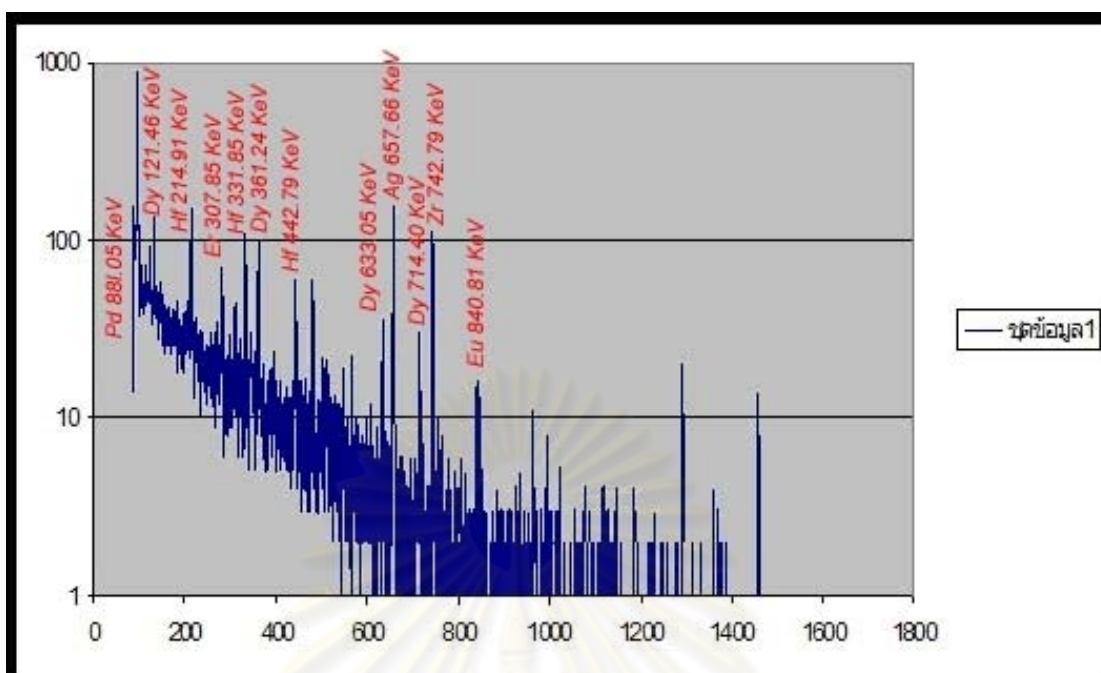
ภาพที่ 4.10 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง A4



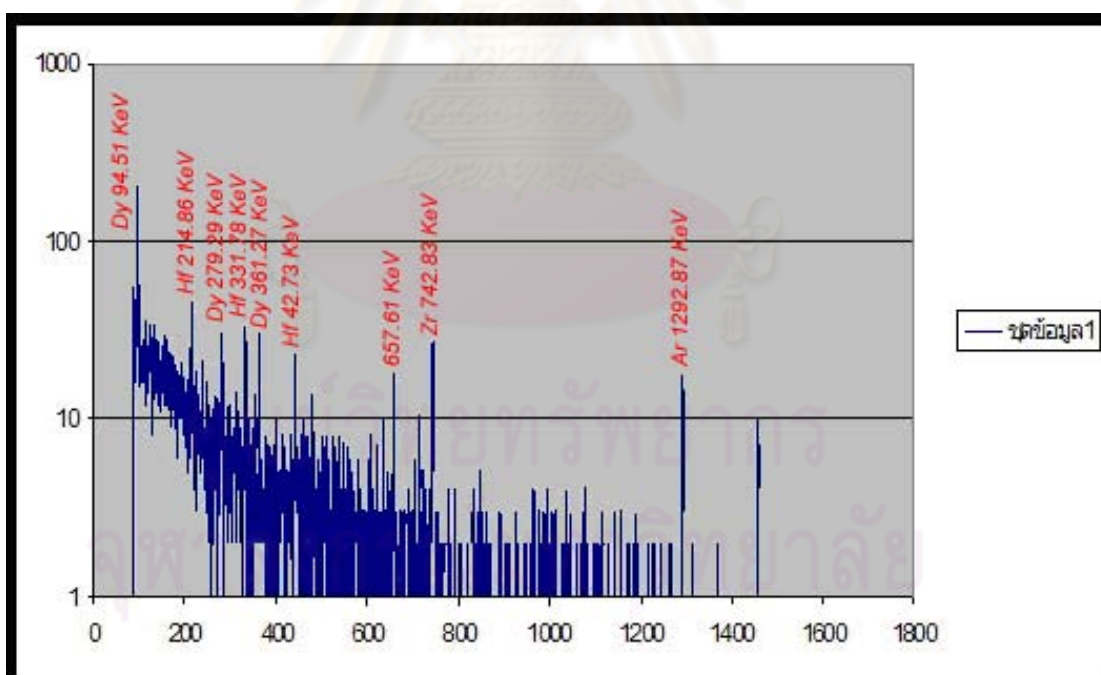
ภาพที่ 4.11 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง A5



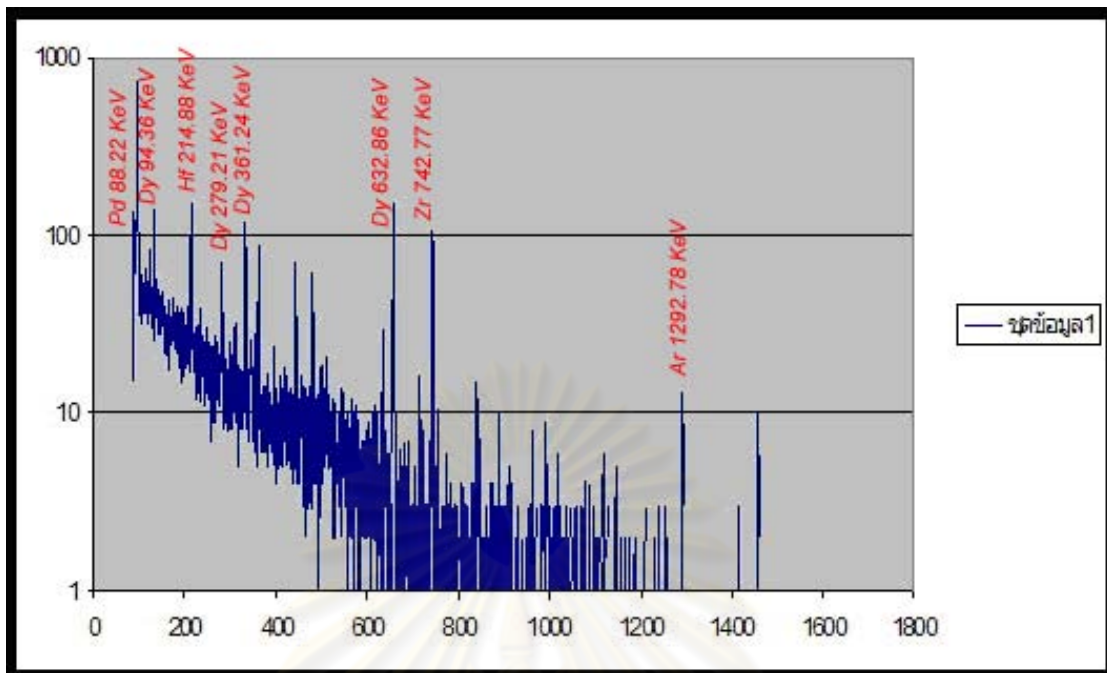
ภาพที่ 4.12 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง A6



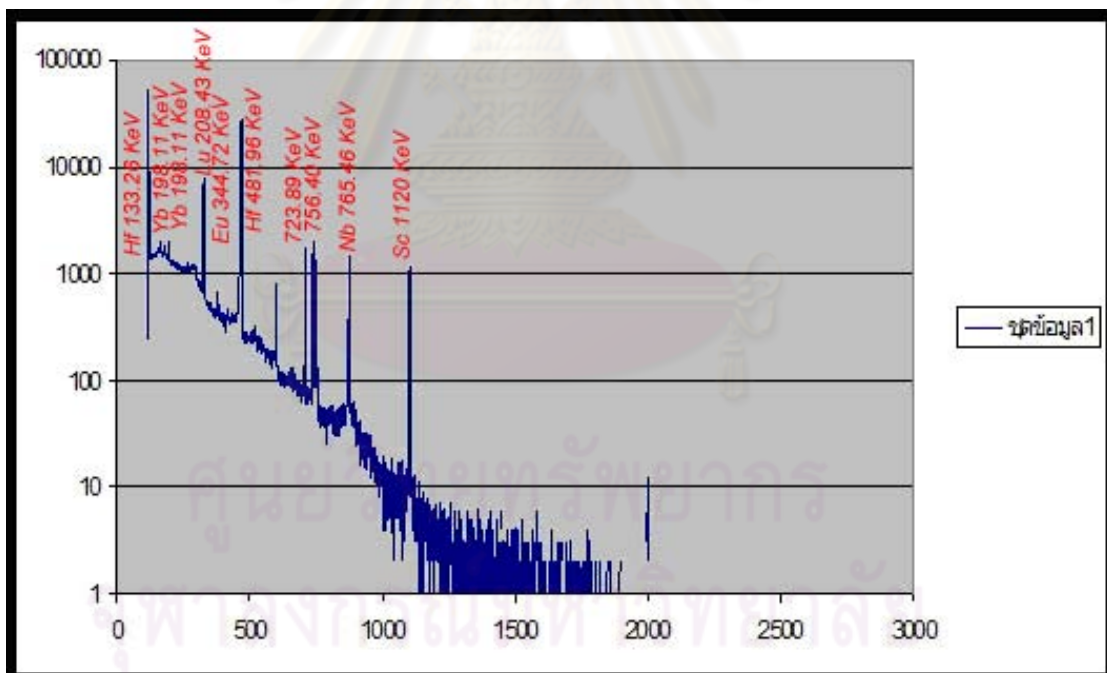
ภาพที่ 4.13 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง B1



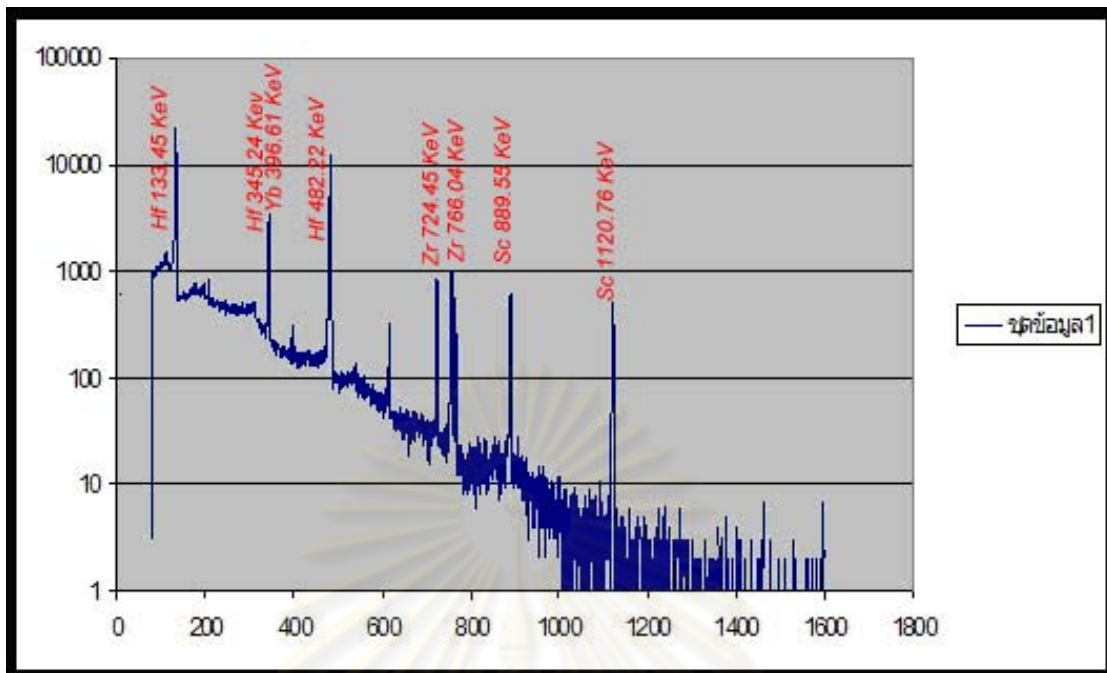
ภาพที่ 4.14 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง B2



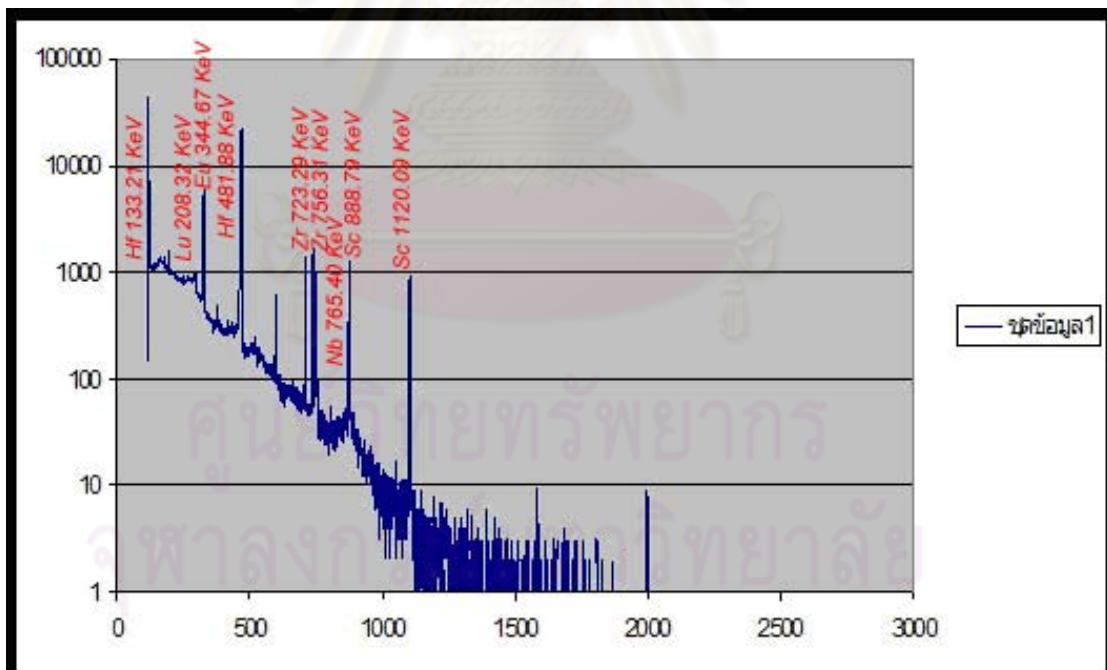
ภาพที่ 4.15 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง B3



ภาพที่ 4.16 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง B4



ภาพที่ 4.17 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง B5



ภาพที่ 4.18 สเปกตรัมขนาดพลังงานรังสีแกมมาของเพทายตัวอย่าง B6

4.5 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพทายด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

A1 ถึง A3 เพทายที่หุงขึ้นสี วิเคราะห์ด้วยสารอ้างอิงผสม Dy_2O_3 , HfO_2 และ ZrO_2

A4 ถึง A6 เพทายที่หุงขึ้นสี วิเคราะห์ด้วยสารอ้างอิงมาตรฐาน (Standard Reference Material 2709 SanJoaquin Soil)

B1 ถึง B3 เพทายที่หุงไม่ขึ้นสี วิเคราะห์ด้วยสารอ้างอิงผสม Dy_2O_3 , HfO_2 และ ZrO_2

B4 ถึง B6 เพทายที่หุงไม่ขึ้นสี วิเคราะห์ด้วยสารอ้างอิงมาตรฐาน (Standard Reference Material 2709 SanJoaquin Soil)

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A1

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Dy-165	94.51	12471.12
	279.38	966.98
	361.28	1160.05
	632.96	400.28
	714.81	354.82
Yb-177	121.62	646.91
	1079.14	52.84
Hf-180	214.97	772.4
	331.87	663.95
	442.74	391.18
Er-171	295.55	169.1
	307.74	280.47
Zr-95	742.94	910.5
Eu-152	841.02	180.44
	962.64	167.43

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A2

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Dy-165	94.42	1711.81
	361.25	173.54
	632.81	77.06
	714.94	61.88
Hf-180	214.96	1311.23
	331.91	937.46
	442.76	583.26
Zr-95	742.88	819.76

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A3

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Dy-165	94.4	973.42
	361.21	87.46
Hf-180	214.95	795.13
	331.89	576.61
	442.69	393
Zr-95	742.8	600.87

ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B1

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Dy-165	121.46	243.38
	279.43	307.98
	361.24	391.53
	633.05	149.88
	714.7	128.25
Hf-180	214.91	588.38
	331.85	360.45
	442.79	213.64
Zr-95	742.79	616.65
Pd-109	88.05	897.18
Ag-110	657.66	720.8

ตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B2

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Dy-165	94.51	1329.93
	279.29	111.49
	361.27	134.94
Hf-180	214.86	340.96
	331.78	319.6
	442.37	193.56
Zr-95	742.83	494.87
Ag-110	657.61	566.15

ตารางที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B3

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Dy-165	94.36	3358.97
	279.21	35.5
	361.24	313.63
	632.86	114.28
	714.55	80.71
Hf-180	214.88	548.73
Zr-95	742.77	528.68
Pd-109	88.2	785.41
Ag-110	657.88	785.21
Ar-41	1292.78	58.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A4

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Yb-175	113.44	955.5
	282.65	414.46
	396.61	980.63
Yb-169	177.63	860.31
	198.4	1162.59
Hf-181	133.35	155339.3
	136.69	22754
	345.24	45388.77
	482.4	100836.32
Zr-95	724.75	7882.62
	756.94	8888.16
Nb-95	766.04	766.3
Sc-46	889.55	3874.811
	1120.78	3199.98

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A5

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Yb-175	113.47	955.5
	345.16	282.87
	396.6	980.63
Yb-169	177.48	860.31
	198.29	1162.59
Hf-181	133.37	15539.2
	136.73	22754
	345.16	45388.77
	482.42	100836.42
Zr-95	724.46	788.62
	756.97	8888.16
Nb-95	766.03	5196.49
Sc-46	889.54	3874.71
	1120.8	3199.8
Lu-177	208.75	2399.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง A6

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Yb-175	113.48	3120.12
	282.67	908.45
	396.44	1745.67
Yb-169	177.46	1522.6
	198.15	2956.22
Hf-181	133.28	93003.33
	136.61	13536.41
	345.1	25571.38
	ND	ND
Zr-95	724.35	4908.55
	756.88	5592.36
Nb-95	765.98	3168.12
Sc-46	889.45	2150.39
	1120.7	1727.59
Lu-177	208.97	4054.27
La-140	1596.29	59.73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคทีเวชันเพทายตัวอย่าง B4

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Yb-175	282.34	405.98
	344.74	51393.26
	396.52	755.67
Yb-169	177.41	1079.38
	198.11	989.89
Hf-181	133.26	216018
	481.96	116310.48
Zr-95	723.89	7088.42
	756.4	8187.42
Nb-95	765.46	4995.52
Sc-46	888.96	6535.43
	1120.16	5416.77
Lu-177	208.43	2094.78
Eu-152	344.74	51393.26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B5

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Yb-175	113.44	1617.86
	282.65	627.46
	396.61	912.29
Yb-169	177.73	651.52
	198.4	778.55
Hf-181	133.35	112807.59
	136.69	16723.97
	345.24	31880.69
	482.4	71966.57
Zr-95	724.45	4871.71
	756.94	5733.5
Nb-95	766.04	3474.89
Sc-46	889.55	3822.51
	1120.78	3056.7
Lu-177	208.6	2035.98

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันเพทายตัวอย่าง B6

Element	Energy(keV)	Net Peak Area
Yb-175	396.1	538.71
Yb-169	177.1	740.55
	197.75	733.88
Hf-181	133.21	16870.95
	481.88	88136.7
Zr-95	723.79	5856.48
	756.31	6669.96
Nb-95	765.4	3900.74
Sc-46	888.79	5182.88
	1120.09	4319.39
Lu-177	208.32	1773.24
Eu-152	344.67	39347.65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.32 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุเซอร์โคเนียมในตัวอย่งเพทายหุงขึ้นสีจากการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

sample	Wt.	Td	Td(min)	At	A0	Zr-S1	Zr-S2	Average	SD
A-1	0.05095	0:00:00	0.00	858	858	0.0205	0.0172	0.0188	0.0011
A-2	0.05233	0:16:19	16.32	797	806.0233	0.0188	0.0157	0.0172	0.0010
A-3	0.04454	0:31:36	31.60	612	625.4899	0.0171	0.0143	0.0157	0.0009
S-1	0.0382	17:59:42	1079.70	567	1194.298	0.0382	0.0319	-	-
S-2	0.02915	18:50:25	1130.42	381	831.0969	0.0348	0.0291	-	-

Wt = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

Td = เวลาที่เริ่มต้น

At = Peak Area ของสารตัวอย่าง

A0 = Peak Area ของสารมาตรฐาน

Zr-S1 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 1

Zr-S2 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 2

Average = ค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ

SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.33 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุเซอร์โคเนียมในตัวอย่งเพทายหุงไม่ขึ้นสีจากการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

sample	Wt.	Td	Td(min)	At	A0	Zr-S1	Zr-S2	Average	SD
B-1	0.03821	0:00:00	0.00	641	641	0.0170	0.0225	0.0198	0.0019
B-2	0.03334	0:12:08	12.13	511	515.2958	0.0157	0.0208	0.0182	0.0018
B-3	0.04424	0:24:02	24.03	527	535.8116	0.0123	0.0163	0.0143	0.0014
S-3	0.02803	18:18:02	1098.03	362	772.2033	0.0280	0.0371	-	-
S-4	0.0302	18:33:39	1113.65	314	677.0679	0.0228	0.0302	-	-

Wt = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

Td = เวลาที่เริ่มต้น

At = Peak Area ของสารตัวอย่าง

A0 = Peak Area ของสารมาตรฐาน

Zr-S1 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 1

Zr-S2 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 2

Average = ค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ

SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.34 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุฮาฟเนียมในตัวอย่างเพทายหุงขึ้นสีจากการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

Hf-181		$T_{1/2}$		42.3 hr					
sample	Wt.	Td	Td(min)	At	A0	Hf-S1 (ppm)	Hf-S2 (ppm)	Average (ppm)	SD ($\times 10^{-6}$)
A-1	0.05095	0:00:00	0.00	652	652	30.8871	40.2852	40.0863	1.4075
A-2	0.05233	0:16:19	16.32	1021	1056.46	60.1322	60.7603	60.4466	2.2205
A-3	0.04454	0:31:36	31.60	633	676.2684	40.6122	50.0844	40.8484	1.6700
S-1	0.00542	17:59:42	1079.70	1010	9670.744	0.0053 g	0.0059 g	-	-
S-2	0.00526	18:50:25	1130.42	776	8262.038	0.0042 g	0.0052 g	-	-

Wt = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

Td = เวลาที่เริ่มต้น

At = Peak Area ของสารตัวอย่าง

A0 = Peak Area ของสารมาตรฐาน

Hf-S1 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 1

Hf-S2 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 2

Average = ค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.35 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุเซอร์โคเนียมในตัวอย่งเพทายหุงไม่ขึ้นสีจากการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

Hf-181 $T_{1/2}$ 42.3 hr

sample	Wt.	Td	Td(min)	At	A0	Hf-S1 (ppm)	Hf-S2 (ppm)	Average (ppm)	SD ($\times 10^{-6}$)
B-1	0.03821	0:00:00	0.00	366	366	50.518	40.3972	40.9575	1.3594
B-2	0.03334	0:12:08	12.13	307	314.8938	50.441	40.3352	40.8888	1.3405
B-3	0.04424	0:24:02	24.03	478	502.6519	60.546	50.2153	50.8805	1.6125
S-3	0.00204	18:18:02	1098.03	726	7223.287	0.0020 g	0.0162 g	-	-
S-4	0.00375	18:33:39	1113.65	298	3063.413	0.0004 g	0.0037 g	-	-

Wt = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

Td = เวลาที่เริ่มต้น

At = Peak Area ของสารตัวอย่าง

A0 = Peak Area ของสารมาตรฐาน

Hf-S1 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 1

Hf-S2 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 2

Average = ค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.36 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุดีสฟิฟิซึมในตัวอย่างพทหายหุงขึ้นลีจากการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน

Dy-165 $T_{1/2}$ 2.33 hr

sample	Wt.	Td	Td(min)	At	A0	Dy-S1 (ppm)	Dy-S2 (ppm)	Average (ppm)	SD ($\times 10^{-6}$)
A-1	0.05095	0:00:00	0.00	11280	11280	3.997	3.313	3.6551	2.4187
A-2	0.05233	0:16:19	16.32	1854	2010.189	6.935	5.748	6.3422	4.1967
A-3	0.04454	0:31:36	31.60	929	1086.539	4.404	3.650	4.0275	2.6651
S-1	0.00411	17:59:42	1079.70	44328	9356041	0.0041 g	0.0034 g	-	-
S-2	0.00368	18:50:25	1130.42	33345	9049596	0.0044 g	0.0036 g	-	-

Wt = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

Td = เวลาที่เริ่มต้น

At = Peak Area ของสารตัวอย่าง

A0 = Peak Area ของสารมาตรฐาน

Dy-S1 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 1

Dy-S2 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 2

Average = ค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.37 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุดีสฟิฟซีมในตัวอย่างเพทายหุงไม่ขึ้นสีจากการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

Dy-165 $T_{1/2}$ 2.33 hr

sample	Wt.	Td	Td(min)	At	A0	Dy-S1 (ppm)	Dy-S2 (ppm)	Average (ppm)	SD ($\times 10^{-6}$)
B-1	0.03821	0:00:00	0.00	3556	3556	7.888	1.743	1.2661	3.3751
B-2	0.03334	0:12:08	12.13	1227	1303.064	3.312	7.321	5.3172	1.4173
B-3	0.04424	0:24:02	24.03	2976	3352.53	6.423	1.419	1.0313	2.7481
S-3	0.002	18:18:02	1098.03	20417	4719266	0.0020 g	0.0040 g	-	-
S-4	0.00369	18:33:39	1113.65	29103	7268427	0.0010 g	0.0037 g	-	-

Wt = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

Td = เวลาที่เริ่มต้น

At = Peak Area ของสารตัวอย่าง

A0 = Peak Area ของสารมาตรฐาน

Dy-S1 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 1

Dy-S2 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 2

Average = ค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.38 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุสตรอนเทียมในตัวอย่างเพทายหุงขึ้นสีจากการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน

sample	Wt.	Td	Td(min)	At	A0	Sc-S1 (ppm)	Sc-S2 (ppm)	Average (ppm)	SD ($\times 10^{-6}$)
A-4	0.03032	0:00:00	0.00	3822	3822	45.668	46.465	46.07	0.28
A-5	0.04818	0:13:01	13.02	3874	3874.004	29.130	29.638	29.38	0.18
A-6	0.02817	0:25:14	25.23	2150	2150.004	27.650	28.133	27.89	0.17
S-5	0.03955	0:39:50	39.83	1310	1310.004	12	12.209	-	-
S-6	0.04964	0:54:38	54.63	1616	1616.006	11.79	12	-	-

Wt = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

Td = เวลาที่เริ่มต้น

At = Peak Area ของสารตัวอย่าง

A0 = Peak Area ของสารมาตรฐาน

Sc-S1 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 1

Sc-S2 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 2

Average = ค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.39 การวิเคราะห์ผลปริมาณธาตุสตรอนเทียมในตัวอย่งเพทายหุงไม่ขึ้นสีจากการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

Sc-46		$T_{1/2}$		83.8 d					
sample	Wt.	Td	Td(min)	At	A0	Sc-S1 (ppm)	Sc-S2 (ppm)	Average (ppm)	SD ($\times 10^{-6}$)
B-4	0.04424	0:12:08	12.13	6535.43	6535.436	58.0407	58.6075	58.32	0.20
B-5	0.03557	0:00:00	0.00	3822.51	3822.51	42.2219	42.6342	42.43	0.15
B-6	0.03747	0:24:49	24.82	5182.88	5182.889	54.3453	54.8759	54.61	0.19
S-7	0.04215	0:49:11	49.18	1287.37	1287.375	12	12.1171	-	-
S-8	0.03677	1:00:04	60.07	1112	1112.195	11.8839	12	-	-

Wt = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

Td = เวลาที่เริ่มต้น

At = Peak Area ของสารตัวอย่าง

A0 = Peak Area ของสารมาตรฐาน

Sc-S1 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 1

Sc-S2 = ปริมาณธาตุที่คำนวณได้เทียบสารมาตรฐานตัวที่ 2

Average = ค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.40 แสดงผลปริมาณธาตุที่พบเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของเพทาย

รหัส	Zr (%)	Hf(ppm)	Dy(ppm)	Sc(ppm)	Yb(ppm)	Er(ppm)	Eu(ppm)	Pd(ppm)	Ag(ppm)	Ar(ppm)	Nb(ppm)	Lu(ppm)	La(ppm)
A1	37.088	4.0863	3.6551	D	D	D	D	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A2	33.028	6.4466	6.3422	D	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A3	35.380	4.8484	4.0275	D	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
A4	D	D	D	46.0721	D	ND	ND	ND	ND	ND	D	ND	ND
A5	D	D	D	29.3823	D	ND	ND	ND	ND	ND	D	D	ND
A6	D	D	D	27.8934	D	ND	ND	ND	ND	ND	D	D	D
B1	51.905	4.9575	1.2661	D	ND	ND	ND	D	D	ND	ND	ND	ND
B2	54.806	4.8888	5.3172	D	ND	ND	ND	ND	D	ND	ND	ND	ND
B3	32.366	5.8805	1.0313	D	ND	ND	ND	D	D	D	ND	ND	ND
B4	D	D	D	58.3231	D	ND	D	ND	ND	ND	D	D	ND
B5	D	D	D	42.4311	D	ND	ND	ND	ND	ND	D	D	ND
B6	D	D	D	54.6124	D	ND	D	ND	ND	ND	D	ND	ND

D = Detected ND = Not Detected

4.5.1 จาการวิเคราะห์ที่เชิงปริมาณสามารถสรุปได้ดังนี้

เพทายหุงขึ้นสีพบปริมาณ Zr ทั้งหมดประมาณ 30-35%

เพทายหุงไม่ขึ้นสีพบปริมาณ Zr เกือบทั้งหมดประมาณ 50-54% และมีบางตัวที่ 32%

เพทายหุงขึ้นสีพบปริมาณ Hf ทั้งหมดประมาณ 4-6.5 ppm

เพทายหุงไม่ขึ้นสีพบปริมาณ Hf เกือบทั้งหมดประมาณ 4.9-5.8 ppm เท่านั้น

เพทายหุงขึ้นสีพบปริมาณ Dy ทั้งหมดประมาณ 0.04-0.37 ppm

เพทายไม่หุงขึ้นสีพบปริมาณ Dy ทั้งหมดประมาณ 0.05-0.13 ppm

เพทายหุงขึ้นสีพบปริมาณ Sc ทั้งหมดประมาณ 27-46 ppm

เพทายไม่หุงขึ้นสีพบปริมาณ Sc ทั้งหมดประมาณ 42-58 ppm



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.2 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพสามารถสรุปได้ดังนี้

เพทายหุงขึ้นสีพบ Yb ทั้งหมด

เพทายหุงไม่ขึ้นสีพบ Yb ทั้งหมด

เพทายหุงขึ้นสีพบ Er บางตัว

เพทายหุงไม่ขึ้นสีไม่พบ

เพทายหุงขึ้นสีพบ Eu บางตัวอย่าง

เพทายหุงไม่ขึ้นสีพบ Eu บางตัวอย่าง

เพทายหุงขึ้นสีไม่พบ Pd

เพทายหุงไม่ขึ้นสีพบ Pd บางตัวอย่าง

เพทายหุงขึ้นสีไม่พบ Ag

เพทายหุงไม่ขึ้นสีพบ Ag ทั้งหมด

เพทายหุงขึ้นสีพบ Nb ทั้งหมด

เพทายหุงไม่ขึ้นสีพบ Nb ทั้งหมด

เพทายหุงขึ้นสีพบ Lu บางตัวอย่าง

เพทายหุงไม่ขึ้นสีพบ Lu ทั้งหมด

เพทายหุงขึ้นสีพบ La บางตัวอย่าง

เพทายหุงไม่ขึ้นสีไม่พบ La

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การให้ความร้อนกับเพทายและคัดเลือกเพทายที่ให้ความร้อนแล้วไม่เปลี่ยนสี

จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเจน ในเตาหุงพลอยแบบท่อ พบว่าเพทายที่หุงแล้วเป็นส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 90 เมื่อไปทำการเจียรในจะใสไร้สีนั้นเป็นเพทายที่หุงขึ้นสี ส่วนที่คงสภาพสีเดิมไว้คือสีเหลืองทึบแสงเป็นเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีคือสียังคงเดิม

5.1.2 การฉายรังสีแกมมาให้กับเพทายที่ให้ความร้อนแล้วไม่เปลี่ยนสี

ผลจากการฉายรังสีแกมมาปริมาณรังสีแกมมาตั้งแต่ 200 kGy จนถึง 1,000 kGy พบว่าเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีนั้นจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองอ่อนจะกลายเป็นสีแดง และถ้าให้ปริมาณรังสีแกมมามากขึ้น สีแดงเดิมนั้นจะยิ่งเข้มขึ้น

5.1.3 การประเมินสีของเพทายผ่านการฉายรังสีแกมมา

การประเมินค่าสีเพทายด้วยแผ่นเทียบสี แผ่นเทียบสี Munsell ตามมาตรฐาน GIA พบว่าเพทายหุงไม่ขึ้นสีเมื่อฉายรังสีแกมมาประเมินค่าสี (Hue) ส่วนใหญ่อยู่ในระดับค่าใกล้เคียงกัน รวมถึงระดับความทึบแสง (Tone) และความบริสุทธิ์ของสี (Saturate) ซึ่งค่าคุณสมบัติทุกส่วนนี้นั้นเมื่อเทียบกับการประเมินสีของเพทายที่ยังไม่ผ่านการฉายรังสีแกมมาพบว่าค่าที่มากขึ้นกว่าเดิมทุกค่า ส่วนเพทายที่หุงขึ้นสีนั้นยังเป็นสีขาวใส

ผลจากการฉายรังสีแกมมาประเมินได้ว่าสีของเพทายผ่านการฉายรังสีแกมมานั้น เป็นสีตามความต้องการทางตลาดพลอยมากขึ้น

การประเมินค่าสีด้วย แผ่นเทียบสี Munsell นั้นประเมินค่าต่างๆสามจุดรอบเพทายเพื่อหาค่าเฉลี่ย และประเมินค่าสีที่อุณหภูมิจากไส้หลอดไฟ 5500 K ตามมาตรฐาน GIA กำหนดไว้

5.1.4 การประเมินสีของเพทายหลังผ่านการฉายแสงหลอดไฟเพื่อทดสอบการจางสี

การประเมินค่าสีเพทายด้วย แผ่นเทียบสี Munsell ตามมาตรฐาน GIA พบว่าเพทายหุงไม่ขึ้นสีเมื่อฉายแสงจากหลอดไฟประมาณ 12 วันแล้วประเมินค่าสี (Hue) ส่วนใหญ่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าความทึบแสง (Tone) มีค่าความสว่างมากขึ้นจากเดิมและความบริสุทธิ์ของสี (Saturate) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม ค่าคุณสมบัติทุกส่วนนี้ เมื่อเทียบกับการประเมินสีของเพทายฉายรังสี

แกมมา พบว่ามีความสว่าง (Tone) ที่มากขึ้นกว่าเดิมทุกค่า ค่า Saturate คงที่และค่า Hue จะคงที่ จึงแสดงว่า สีของเพทายหลังฉายรังสีแกมมาจึงเสถียร

สรุปได้ว่าแสงจากหลอดไฟไม่ทำให้สีของเพทายที่ฉายรังสีแกมมาจางลงแต่จะไล่ขึ้น ทำให้สีไม่เด่นชัด และวิเคราะห์ได้ว่าน่าจะไม่เป็นตามความต้องการของตลาดนัก

การประเมินค่าสีของพลอยเพื่อเทียบกับความต้องการทางการตลาดนั้น ค่าที่มีผลต่อราคาพลอยที่สูงขึ้นนั้นนอกจากความต้องการของชนิดสีของพลอยนั้น ก็คือความทึบแสงที่อยู่ในระดับปานกลาง (Tone 4-7) และค่าความบริสุทธิ์ของสีพลอยยิ่งมีค่ามาก นั้นยิ่งส่งผลต่อราคาที่สูงขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อราคานอกจากสีของพลอยแล้ว ความมันวาวของพลอย เนื้อในพลอย มลทินภายใน การกระจายของสี รอยแตกหัก และฤดูกาลของความต้องการของพลอยยังมีผลต่อราคาด้วย

5.1.5 การหาปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

การวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์มีข้อจำกัดการหาได้ในระดับ 0.01 % ขึ้นไปแต่ในระดับปริมาณที่เป็น ppm ต่อมวลนั้นไม่สามารถหาได้

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพพบเฉพาะธาตุของ เซอร์โคเนียม (Zr) ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นธาตุหลักและ พบ อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นธาตุรอง เป็นส่วนผสมในเพทายที่หุงขึ้นสี เท่านั้นแต่เพทายที่หุงไม่ขึ้นสีไม่ปรากฏพบธาตุอะลูมิเนียม

การวิเคราะห์เชิงปริมาณพบว่า ปริมาณเซอร์โคเนียมของเพทายที่หุงขึ้นสีเป็นประมาณ 30% โดยน้ำหนัก ปริมาณซิลิกอนของเพทายที่หุงขึ้นสีเป็นประมาณ 50% โดยน้ำหนัก ปริมาณออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงเพทายที่หุงไม่ขึ้นสี ธาตุอื่นๆและปริมาณธาตุอื่นๆตรวจไม่พบ

จากการสันนิษฐานสีเพทายเมื่อเทียบกับปริมาณของธาตุที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสี เมื่อเทียบกับการศึกษาเบื้องต้นของการเปลี่ยนสีเพทายด้วยการเผา(อารยา มุ่งชำนาญกิจ, พิเชษฐ ลิมสุวรรณ, พงษ์เทพ วิโนทัย, 2550) แล้วสันนิษฐานได้ว่า ค่าปริมาณของเซอร์โคเนียมและปริมาณของซิลิกอน นั้นอาจจะมีผลต่อสีเหลืองของเพทาย ในรูปของ SiO_4^{-4} และ ZrO_8^{-12} ในโครงสร้างของ ZrSiO_4 ปริมาณธาตุเซอร์โคเนียมและซิลิกอนที่สูง ส่งผลต่อการคงสภาพเดิมสีเหลืองของเพทายทำให้หุงด้วยความร้อนที่ 1,000 องศาเซลเซียสไม่เปลี่ยนสี และมีผลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเหลืองเป็นสีแดงเมื่อถูกฉายรังสีแกมมา และโครงสร้างที่ประกอบด้วย SiO_4^{-4} และ ZrO_8^{-12} น่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนสีเพทายจากการฉายรังสีแกมมา นอกจากนี้จากการตรวจสอบ

พบว่า ไม่พบ Al ในเพทายหุงไม่ขึ้นสี แต่พบเพทายหุงขึ้นสีเป็นสีขาวใสทุกตัวอย่าง สันนิษฐานได้ ถ้าพบในเพทาย AI จะเกิดการต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลืองเป็นสีขาวใสเมื่อหุงด้วยความร้อน

เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นการวิเคราะห์ธาตุที่ผิวของ ตัวอย่าง (Surface Analysis) เท่านั้นจึงไม่ควรนำเพทายที่ไม่ผ่านการเจียระไนมาวิเคราะห์ เพทาย ที่วิจัยนั้นควรผ่านการเจียระไนเป็นพื้นที่ผิวหน้าตัดเรียบก่อนทำการวิเคราะห์ ผงแร่ที่ติดเคลือบผิว อยู่อาจจะถูกวิเคราะห์ไปด้วย ทำให้ผลการทดลองมีค่าผิดพลาดไป บางธาตุตรวจสอบพบว่า เพทายที่ไม่ผ่านการเจียระไนจะตรวจพบ Fe (เหล็ก) ตะกั่ว (Pb) แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) แต่เมื่อทำการเจียระไนออกแล้วไปวิเคราะห์ก็กลับไม่พบธาตุเหล่านี้

5.1.6 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

องค์ประกอบของธาตุที่พบในตัวอย่างโดยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยนิวตรอนแอคติเวชันจำแนกได้ สามประเภทคือ

5.1.6.1 ธาตุหลัก ประกอบด้วย Zr ,Si และ O

5.1.6.2 ธาตุรอง ประกอบด้วย Hf และ Al

5.1.6.3 ธาตุปริมาณน้อย ประกอบด้วย Sc ,Yb ,Dy ,Lu ,Er ,Eu ,Ag ,Ar ,Nb และLa

จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพโดยแบ่งกลุ่มเป็นเพทายที่หุงขึ้นสี A1 ถึง A6 และกลุ่มเพทายที่หุงไม่ขึ้นสี B1 ถึง B6

การตรวจพบธาตุที่ปรากฏในสองกลุ่มคือ Zr ,Hf ,Dy ,Yb ,Sc , Nb และ Lu ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการพบธาตุในเพทายจาก Agilent ICP-MS (Macquarie University, Australia :Oct 2007-Issue 32)

การตรวจพบธาตุในกลุ่มเพทายที่หุงขึ้นสีเท่านั้น มี Er และ La นั้นสันนิษฐานว่าธาตุเหล่านี้ อาจจะมีผลต่อการหุงขึ้นสีของเพทาย

การตรวจพบธาตุในกลุ่มเพทายที่หุงไม่ขึ้นสีเท่านั้นมี Eu, Pd, Ag สันนิษฐานว่าธาตุเหล่านี้ อาจจะมีผลต่อการหุงไม่ขึ้นสีของเพทาย

ปริมาณธาตุหลัก ธาตุรอง และธาตุปริมาณน้อยแต่ละธาตุอาจจะเป็นสิ่งหนึ่งในการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเพทายหุงขึ้นสีและหุงไม่ขึ้นสี

ธาตุปริมาณน้อยบางชนิดสามารถตรวจพบเมื่อวิเคราะห์เชิงคุณภาพแต่ไม่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้เพราะไม่มีสารอ้างอิงมาตรฐานใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณ

ธาตุปริมาณน้อยบางชนิดที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่จะพบอยู่ในพหุธาตุแต่ต้องอาศัยเวลาในการสลายตัวของไอโซโทปค่อนข้างมาก เพราะไอโซโทปของ Zr ที่มีอยู่ปริมาณมากใช้เวลาในการสลายตัวนาน ด้วยเหตุของระยะเวลาเป็นผลให้ไม่สามารถระบุถึงปริมาณของธาตุบางตัวในตัวอย่างได้ จะระบุได้แต่เพียงว่าเป็นธาตุปริมาณน้อยชนิดหนึ่งที่น่าจะพบในพหุธาตุเท่านั้น

5.1.7 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่สามารถหาปริมาณได้นั้น ปริมาณธาตุของ Zr ในกลุ่มพหุธาตุหุงขึ้นสีมีน้อยกว่ากลุ่มพหุธาตุหุงขึ้นสีซึ่งเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งตรงกับการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุจากเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์และสอดคล้องกับทฤษฎีที่โครงสร้างผลึกของพหุธาตุ

จากผลการวิเคราะห์หาธาตุหลักและธาตุรองเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์และนิวตรอนแอคติเวชัน พบว่าทั้งสองตรวจพบได้ทั้งสองชนิดพบปริมาณของเซอร์โคเนียมที่ได้สอดคล้องกัน

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของ Hf ปริมาณธาตุในกลุ่มพหุธาตุหุงขึ้นสีมีมากกว่าพหุธาตุที่หุงไม่ขึ้นสีเล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยการหาปริมาณ Hf ในพหุธาตุของ Agilent ICP-MS ที่วิเคราะห์ว่าพหุธาตุสีเหลืองจะตรวจพบปริมาณ Hf น้อยกว่าพหุธาตุสีแดงโดยธรรมชาติ

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของ Dy ของทั้งสองกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับงานวิจัยการหาปริมาณ Dy ในพหุธาตุในวารสารชื่อ Agilent ICP-MS (ISSUE 32, Oct 2007) และสันนิษฐานว่าธาตุ Dy ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของพหุธาตุ

การวิเคราะห์หาปริมาณของ Sc ในกลุ่มพหุธาตุที่หุงขึ้นสีปริมาณน้อยกว่ากลุ่มพหุธาตุที่หุงไม่ขึ้นสี สันนิษฐานได้ว่าธาตุ Sc อาจจะมีผลต่อการหุงไม่ขึ้นสีของพหุธาตุ

จากการตรวจสอบโดยการหาปริมาณธาตุ Zr , Hf และ Dy พบว่าการอบตัวอย่างจากท่อเทอร์มอลนิวตรอน และท่อฟอสฟอรัสนิวตรอนซึ่งมีชนิดของนิวตรอนต่างกัน ผลที่ได้จากการตรวจหาปริมาณธาตุ Zr , Hf และ Dy มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชันมีความถูกต้องเชื่อถือได้

ในการวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะความสัมพันธ์ของชนิดและปริมาณธาตุกับสีของเพทายหุงขึ้นสี และหุงไม่ขึ้นสีเท่านั้น มิได้ศึกษาจากอิทธิพลโครงสร้างภายในที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเพทาย ในรูปโครงสร้างที่เกี่ยวข้องในเพทายเช่น SiO_4 tetrahedrons และ ZrO_8 dodecahedron

5.1.8 การเปลี่ยนแปลงของสีเพทายที่ฉายรังสีแกมมา

เมื่อฉายรังสีแกมมากับเพทายจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดงทั้งสองกลุ่ม สันนิษฐานว่าการเปลี่ยนแปลงสีอื่นๆเป็นสีแดงนั้น น่าจะเป็นผลจากสภาวะการเกิดปรากฏการณ์ Color center ของอะตอมที่อยู่ภายในทั้งสองกลุ่มซึ่งอ้างอิงจากทฤษฎีการเกิด Color Center หนึ่งอาจจะสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้ว่าสัดส่วนของปริมาณธาตุของ Zr และ ปริมาณธาตุของ Hf ในเพทายจะส่งผลต่อการเปลี่ยนเป็นสีแดงของเพทายทั้งสองกลุ่มด้วยการหุงด้วยความร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุในเพทายยังไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุบางตัวที่ตรวจพบจากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ทุกตัว และธาตุบางชนิดอาจจะมีแต่ไม่สามารถตรวจพบได้เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องเวลาวัดรังสีและประสิทธิภาพของเครื่องวัดรังสีในงานวิจัยนี้วิจัย จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องธาตุปริมาณน้อยมากบางชนิดที่อยู่ในเพทายเช่น ยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) ตะกั่ว (Pb) ก็อาจจะมีผลต่อการเปลี่ยนสีของเพทาย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถต่อยอดค้นคว้าต่อไปได้ในอนาคต (อาทร สุกุลวรกิจ, 2545 การศึกษาธาตุปริมาณน้อยในเพทายด้วยเทคนิคนิวเคลียร์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จัษฎงกช ศรัญญูวัจน, มั่นสศร ทศนอุดม, กุศล ศรชม, เชาว์ รอดทองคำ และ
อัจฉรา แสงอรย์วันษ์ม, 2535 การหลอมแร่เซอร์คอนด้วยต่าง, น. 113-126. ใน รายงาน
การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 4, 20-22 ตุลาคม 2535.
สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, กรุงเทพฯ.

ปานทิพย์ อัมพรรัตน์ และ อัจฉรา แสงอรย์วันษ์, 2543 การศึกษาเบื้องต้นของธาตุปริมาณน้อยใน
ตัวอย่างโพลินด้วยเทคนิคการอบนิวตรอน, น. 48-49. ใน รายงานวิชาการกองฟิสิกส์
ประจำปี 2543. กองฟิสิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, กรุงเทพฯ.

วิเชียร รัตนธงชัย, วันชัย ธรรมวานิช และ สมพร จงงค์, 2542 การวิเคราะห์ปริมาณ
ซิลิกอนโดยใช้ปฏิกิริยา (n, p) จากการอบนิวตรอน, น. 35-45. ใน รายงานวิชาการกอง
ฟิสิกส์ ประจำปี 2542. กองฟิสิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, กรุงเทพฯ.

สวัสดี ปานเนา, 2541 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของเพทายก่อนและหลังการเผาเพิ่มคุณค่า.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

รศ.ดร.กาญจนา ชูครุวงศ์, 2541 การประเมินสีอัญมณี, น. 72-84 ในหนังสือแบบเรียน การ
ประเมินค่าและราคาอัญมณี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ

สัทธาทิพย์ ศรีไพศาลพัฒน์, 2543 ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ของพลอยโพลินจากแหล่งแพร่,
น. 229. ใน รายงานการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้ง
ที่ 26, 18-20 ตุลาคม 2543. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อาทร สกุลวรกิจ, 2545 การศึกษาธาตุปริมาณน้อยในเพทายด้วยเทคนิคนิวเคลียร์. วิทยานิพนธ์.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

วัลลภ บุญคง, อาริรัตน์ คอนดวงแก้ว, 2548 การเปลี่ยนสีของอัญมณีชายรัสเซีย, น. 6-12 ใน

บทความวิชาการอัญมณีชายรังสีสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. ISBN 974-7400-4-3, 2548.

วัลลภ บุญคง, อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว, 2548 การเพิ่มคุณค่าพลอยด้วยการอบรังสี, 13-22 ใน บทความวิชาการอัญมณีชายรังสีสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. ISBN 974-7400-4-3, 2548.

บทความวิชาการสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย,2550 ทฤษฎีการเปลี่ยนสีพลอย ไฮลด์คัลเลอร์ เซนเตอร์ คัลเลอร์เซนเตอร์ ธาตุที่มีปัจจัยต่อการเปลี่ยนสี และการแลกเปลี่ยนประจุ : Available from <http://www.nst.or.th/tech.htm>

บทความวิชาการสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย,2550 การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีวาวรังสีเอกซ์ : Available from <http://www.nst.or.th/tech.htm>

บทความวิชาการสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย,2550 วิเคราะห์ด้วยวิธีออบรังสีนิวตรอน : Available from <http://www.nst.or.th/tech.htm>

อารยา มุ่งชำนาญกิจ, พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ, พงษ์เทพ วิโนทัย, 2550 การศึกษาเบื้องต้นของการเปลี่ยนสีเพทายด้วยการเผา. Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology, นครราชสีมา

บทความการเกิดสี, 2551 ทฤษฎีของสี: Available from <http://www.thaigoodview.com/node/15578>

บทความการเกิดแสงสี,2551 ทฤษฎีแสงสี: Available from <http://www.prc.ac.th/newart/webart/colour06.html>

ภาษาอังกฤษ

Gibbs, W. Ann Phys. 71: 559. Cited by G.F. Kunz. 1968. Gems and Precious Stones of North America. Docer Publications, Inc., New York. 367 p. 80

Hasegawa, S. 1957. Greyish Green to Brown Zircon, with Allanite, Fergusonite and Thorogummite in Pegmatite, Hayamadake, Fukushima Pref, Japan. Sci Rept Tohoku Univ., ser 3. 5: 345-371. Cited by Deer, W.A., R.A. Howie and J. Zussman. 1992. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 2nd ed., Longman Scientific and Technical, England. 696 p.

Horiba. 2001. Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Element Analyzer MESA-500 W Instruction Manual. HORIBA, Ltd., Japan. 123 p.

Kunz, G.F. 1968. Gems and Precious Stones of North America. Docer Publications, Inc., New York. 367 p.

Landsberger, S. and D. Wu. 1993. Improvement of Analytical Sensitivities for the Determination of Antimony, Arsenic, Cadmium, Indium, Iodine, Molybdenum, Silicon and Uranium in Airborne Particulate Matter by Epithermal Neutron Activation Analysis. J Radioanal Nucl Chem. 167(2) : 219-225.

Nassau, K. 1994. Gemstone Enhancement: History, Science and State of the Art. 2nd ed., Butterworth Heinemann, Ltd., London. 251 p.

Agilent ICP-MS Journal, S.Ehlou. 2007 New Standard Reference Material for In-situ U-Pb Zircon Dating, Macquarie University, Australia :Oct 2007-Issue 32



ต้นฉบับไม่มีหน้า 109

NO PAGE 109 IN ORIGINAL

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนและพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (อาทร สกุลวรวิจิ, 2545)

Atomic Number	Element	K series						L series						
		$K_{\alpha 1}$	$K_{\alpha 2}$	$K_{\beta 1}$	$K_{\beta 2}$	$L_{\alpha 1}$	$L_{\alpha 2}$	$L_{\beta 1}$	$L_{\beta 2}$	$L_{\gamma 1}$	$L_{\gamma 2}$			
1	Hydrogen	0.0136												
2	Helium	0.0246												
3	Lithium				0.052									
4	Beryllium				0.116									
5	Boron				0.192									
6	Carbon				0.283									
7	Nitrogen				0.399									
8	Oxygen				0.531									
9	Fluorine				0.687									
10	Neon				0.874		0.048	0.022	0.022					
11	Sodium	1.080		1.067		1.041	0.055	0.034	0.034					
12	Magnesium	1.303		1.297		1.254	0.063	0.050	0.049					
13	Aluminum	1.559		1.553	1.487	1.486	0.087	0.073	0.072					
14	Silicon	1.838		1.832	1.740	1.739	0.118	0.099	0.098					
15	Phosphorus	2.142		2.136	2.015	2.014	0.153	0.129	0.128					
16	Sulfur	2.470		2.464	2.308	2.306	0.193	0.164	0.163					
17	Chlorine	2.819		2.815	2.622	2.621	0.238	0.203	0.202					
18	Argon	3.203		3.192	2.957	2.955	0.287	0.247	0.245					
19	Potassium	3.607		3.589	3.313	3.310	0.341	0.297	0.294					
20	Calcium	4.038		4.012	3.691	3.688	0.399	0.352	0.349			0.344	0.341	
21	Scandium	4.496		4.460	4.090	4.085	0.462	0.411	0.406			0.399	0.395	
22	Titanium	4.964		4.931	4.510	4.504	0.530	0.460	0.454			0.458	0.452	
23	Vanadium	5.463		5.427	4.952	4.944	0.604	0.519	0.512			0.519	0.510	
24	Chromium	5.988		5.946	5.414	5.405	0.679	0.583	0.574			0.581	0.571	
25	Manganese	6.537		6.490	5.898	5.887	0.762	0.650	0.639			0.647	0.636	
26	Iron	7.111		7.057	6.403	6.390	0.708	0.779	0.853			0.704	0.775	
27	Cobalt	7.709		7.649	6.930	6.915	0.933	1.022	0.721			0.849	0.928	
28	Nickel	8.331	8.328	8.264	7.477	7.460	0.794	0.871	0.953			1.009	0.717	

ตารางพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนและพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัว(ต่อ)

Atomic Number	Element	K series								L series				
		K _{2b}	K _{b2}	K _{b1}	K _{s1}	K _{s2}	L _{7ab}	L _{7bb}	L _{7bb}	L _{6s1}	L _{b2}	L _{b1}	L _{s1}	L _{s2}
29	Copper	8.980	8.976	8.904	8.047	8.027	1.045	0.849	0.929			0.790	0.866	
30	Zinc	9.660	9.657	9.571	8.638	8.615	1.015	1.100	1.200			0.948	1.032	
31	Gallium	10.368	10.365	10.263	9.251	9.234	1.117	1.134	1.300			1.122	1.096	
32	Germanium	11.103	11.100	10.981	9.885	9.854	1.420	1.248	1.217			1.216	1.186	
33	Arsenic	11.863	11.863	11.725	10.543	10.507	1.529	1.359	1.323			1.317	1.282	
34	Selenium	12.652	12.651	12.495	11.221	11.181	1.652	1.473	1.434			1.419	1.379	
35	Bromine	13.475	13.465	13.290	11.923	11.877	1.794	1.599	1.552			1.526	1.480	
36	Krypton	14.323	14.313	14.112	12.648	12.597	1.931	1.727	1.675			1.638	1.587	
37	Rubidium	15.201	15.184	14.960	13.394	13.335	2.067	1.866	1.806			1.752	1.694	1.692
38	Strontium	16.106	16.083	15.834	14.164	14.097	2.221	2.008	1.941			1.872	1.806	1.805
39	Yttrium	17.037	17.011	16.736	14.957	14.882	2.369	2.154	2.079			1.996	1.922	1.920
40	Zirconium	17.998	17.969	17.666	15.774	15.690	2.547	2.305	2.220	2.302	2.219	2.124	2.042	2.040
41	Niobium	18.987	18.951	18.621	16.614	16.520	2.706	2.467	2.374	2.462	2.367	2.257	2.166	2.163
42	Molybdenum	20.002	19.964	19.607	17.478	17.373	2.884	2.627	2.523	2.623	2.518	2.395	2.293	2.290
43	Technetium	21.054	21.012	20.585	18.410	18.328	3.054	2.795	2.677	2.792	2.674	2.538	2.424	2.420
44	Ruthenium	22.118	22.072	21.655	19.278	19.149	3.236	2.966	2.837	2.964	2.836	2.683	2.558	2.554
45	Rhodium	23.224	23.169	22.721	20.214	20.072	3.419	3.145	3.002	3.144	3.001	2.834	2.696	2.692
46	Palladium	24.347	24.297	23.816	21.175	21.018	3.617	3.329	3.172	3.328	3.172	2.990	2.838	2.833
47	Silver	25.517	25.454	24.942	22.162	21.988	3.810	3.528	3.352	3.519	3.348	3.151	2.984	2.978
48	Cadmium	26.712	26.641	26.093	23.172	22.982	4.019	3.727	3.538	3.716	3.528	3.316	3.133	3.127
49	Indium	27.928	27.859	27.274	24.207	24.000	4.237	3.939	3.729	3.920	3.713	3.487	3.287	3.279
50	Tin	29.190	29.106	28.483	25.270	25.042	4.464	4.157	3.928	4.131	3.904	3.662	3.444	3.435
51	Antimony	30.486	30.387	29.723	26.357	26.109	4.697	4.381	4.132	4.347	4.100	3.843	3.605	3.595
52	Tellurium	31.809	31.698	30.993	27.471	27.200	4.938	4.613	4.341	4.570	4.301	4.029	3.769	3.758
53	Iodine	33.164	33.016	32.292	28.610	28.315	5.190	4.856	4.559	4.800	4.507	4.220	3.937	3.926
54	Xenon	34.579	34.446	33.644	29.802	29.485	5.452	5.104	4.782	5.036	4.720	4.422	4.111	4.098
55	Cesium	35.959	35.819	34.984	30.970	30.623	5.720	5.358	5.011	5.280	4.936	4.620	4.286	4.272

ตารางพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนและพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัว(ต่อ)

Atomic Number	Element	K series					L series								
		K _{ab}	K _{b2}	K _{b1}	K _{a1}	K _{a2}	L _{Tab}	L _{Iab}	L _{IIab}	L _{IIIab}	L _{a1}	L _{b2}	L _{b1}	L _{a1}	L _{a2}
56	Barium	37.410	37.255	36.376	32.191	31.815	5.995	5.623	5.247	5.531	5.156	4.828	4.467	4.451	
57	Lanthanum	38.931	38.728	37.799	33.440	33.033	6.283	5.894	5.489	5.789	5.384	5.043	4.651	4.635	
58	Cerium	40.449	40.231	39.255	34.717	34.276	6.561	6.165	5.729	6.052	5.613	5.262	4.840	4.823	
59	Praseodymium	41.998	41.772	40.746	36.023	35.548	6.846	6.443	5.968	6.322	5.850	5.489	5.034	5.014	
60	Neodymium	43.571	43.298	42.269	37.359	36.845	7.144	6.727	6.215	6.602	6.090	5.722	5.230	5.208	
61	Promethium	45.207	44.955	-43.945	38.649	38.160	7.448	7.018	6.466	6.891	6.336	5.956	5.431	5.408	
62	Samarium	46.846	46.553	45.400	40.124	39.523	7.754	7.281	6.721	7.180	6.587	6.206	5.636	5.609	
63	Europium	48.515	48.241	47.027	41.529	40.877	8.069	7.624	6.983	7.478	6.842	6.456	5.846	5.816	
64	Gadolinium	50.229	49.961	48.718	42.983	42.280	8.393	7.940	7.252	7.788	7.102	6.714	6.059	6.027	
65	Terbium	51.998	51.737	50.391	44.470	43.737	8.724	8.258	7.519	8.104	7.368	6.979	6.275	6.241	
66	Dysprosium	53.789	53.491	52.178	45.985	45.193	9.083	8.621	7.850	8.418	7.638	7.249	6.495	6.457	
67	Holmium	55.615	55.292	53.934	47.528	46.686	9.411	8.920	8.074	8.748	7.912	7.528	6.720	6.680	
68	Erbium	57.483	57.088	55.690	49.099	48.205	9.776	9.263	8.364	9.089	8.188	7.810	6.948	6.904	
69	Thulium	59.335	58.969	57.576	50.730	49.762	10.144	9.628	8.652	9.424	8.472	8.103	7.181	7.135	
70	Ytterbium	61.303	60.959	59.352	52.360	51.326	10.486	9.977	8.943	9.779	8.758	8.401	7.414	7.367	
71	Lutetium	63.304	62.946	61.282	54.063	52.959	10.867	10.345	9.241	10.142	9.048	8.708	7.654	7.604	
72	Hafnium	65.313	64.936	63.209	55.757	54.579	11.264	10.734	9.556	10.514	9.346	9.021	7.898	7.843	
73	Tantalum	67.400	66.999	65.210	57.524	56.270	11.676	11.130	9.876	10.892	9.649	9.341	8.145	8.087	
74	Tungsten	69.508	69.090	67.233	59.310	57.973	12.090	11.535	10.198	11.283	9.959	9.670	8.396	8.333	
75	Rhenium	71.662	71.220	69.298	61.131	59.707	12.522	11.955	10.531	11.684	10.273	10.008	8.651	8.584	
76	Osmium	73.860	73.393	71.404	62.991	61.477	12.965	12.383	10.869	12.094	10.596	10.354	8.910	8.840	
77	Iridium	76.097	75.605	73.549	64.886	63.278	13.413	12.819	11.211	12.509	10.918	10.706	9.173	9.098	
78	Platinum	78.379	77.866	75.736	66.820	65.111	13.873	13.268	11.559	12.939	11.249	11.069	9.441	9.360	

ตารางพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนและพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัว(ต่อ)

Atomic Number	Element	K series						L series						
		K_{ab}	K_{b2}	K_{b1}	K_{s1}	K_{s2}	L_{1ab}	L_{2ab}	L_{3ab}	L_{s1}	L_{s2}	L_{b1}	L_{s1}	L_{s2}
79	Gold	80.713	80.165	77.968	68.794	66.980	14.353	13.733	11.919	13.379	11.582	11.439	9.711	9.625
80	Mercury	83.106	82.526	80.258	70.821	68.894	14.841	14.212	12.285	13.828	11.923	11.823	9.987	9.896
81	Thallium	85.517	84.904	82.558	72.860	70.820	15.346	14.697	12.657	14.288	12.268	12.210	10.266	10.170
82	Lead	88.001	87.343	84.922	74.957	72.794	15.870	15.207	13.044	14.762	12.620	12.611	10.549	10.448
83	Bismuth	90.521	89.833	87.335	77.097	74.805	16.393	15.716	13.424	15.244	12.977	13.021	10.836	10.729
84	Polonium	93.112	92.386	89.809	79.296	76.868	16.935	16.244	13.817	15.740	13.338	13.441	11.128	11.014
85	Astatine	95.740	94.976	92.319	81.525	78.956	17.490	16.784	14.215	16.248	13.705	13.873	11.424	11.304
86	Radon	98.418	97.616	94.877	83.800	81.080	18.058	17.337	14.618	16.768	14.077	14.316	11.724	11.597
87	Francium	101.147	100.305	97.483	86.119	83.243	18.638	17.904	15.028	17.301	14.459	14.770	12.029	11.894
88	Radium	103.927	103.048	100.136	88.485	85.446	19.233	18.481	15.442	17.845	14.839	15.233	12.338	12.194
89	Actinium	106.759	105.838	102.846	90.894	87.681	19.842	19.078	15.865	18.405	15.227	15.712	12.650	12.499
90	Thorium	109.630	108.671	105.592	93.334	89.942	20.460	19.688	16.296	18.977	15.620	16.200	12.966	12.808
91	Protactinium	112.581	111.575	108.408	95.851	92.271	21.102	20.311	16.731	19.559	16.022	16.700	13.291	13.120
92	Uranium	115.591	114.549	111.289	98.428	94.648	21.753	20.943	17.163	20.163	16.425	17.218	13.613	13.438
93	Neptunium	118.619	117.533	114.181	101.005	97.023	22.417	21.596	17.614	20.774	16.837	17.740	13.945	13.758
94	Plutonium	121.720	120.592	117.146	103.653	99.457	23.097	22.262	18.066	21.401	17.254	18.278	14.279	14.082
95	Americium	124.876	123.706	120.163	106.351	101.932	23.793	22.944	18.525	22.042	17.677	18.829	14.618	14.411
96	Curium	128.088	126.875	123.235	109.098	104.448	24.503	23.640	18.990	22.699	18.106	19.393	14.961	14.743
97	Berkelium	131.357	130.101	126.362	111.896	107.023	25.230	24.352	19.461	23.370	18.540	19.971	15.309	15.079
98	Californium	134.683	133.383	129.544	114.745	109.603	25.971	25.080	19.938	24.056	18.980	20.562	15.661	15.420
99		138.067	136.724	132.781	117.646	112.244	26.729	25.824	20.422	24.758	19.426	21.166	16.018	15.764
100		141.510	140.122	136.075	120.598	114.926	27.503	26.584	20.912	25.475	19.879	21.785	16.379	16.113

ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสและ อุณหภูมิที่สัมพัทธ์
(อาทร สกุลวรวิจิ, 2545)

T/ °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10	0.99973	0.99972	0.99971	0.99970	0.99969	0.99968	0.99967	0.99966	0.99965	0.99964
11	0.99963	0.99962	0.99961	0.99960	0.99959	0.99958	0.99957	0.99956	0.99955	0.99954
12	0.99953	0.99951	0.99950	0.99949	0.99948	0.99947	0.99946	0.99944	0.99943	0.99942
13	0.99941	0.99939	0.99938	0.99937	0.99935	0.99934	0.99933	0.99931	0.99930	0.99929
14	0.99927	0.99926	0.99924	0.99923	0.99922	0.99920	0.99919	0.99917	0.99916	0.99914
15	0.99913	0.99911	0.99910	0.99908	0.99907	0.99905	0.99904	0.99902	0.99900	0.99899
16	0.99897	0.99896	0.99894	0.99892	0.99891	0.99889	0.99887	0.99885	0.99884	0.99882
17	0.99880	0.99879	0.99877	0.99875	0.99873	0.99871	0.99870	0.99868	0.99866	0.99864
18	0.99862	0.99860	0.99859	0.99857	0.99855	0.99853	0.99851	0.99849	0.99847	0.99845
19	0.99843	0.99841	0.99839	0.99837	0.99835	0.99833	0.99831	0.99829	0.99827	0.99825
20	0.99823	0.99821	0.99819	0.99817	0.99815	0.99813	0.99811	0.99808	0.99806	0.99804
21	0.99802	0.99800	0.99798	0.99795	0.99793	0.99791	0.99789	0.99786	0.99784	0.99782
22	0.99780	0.99777	0.99775	0.99773	0.99771	0.99768	0.99766	0.99764	0.99761	0.99759
23	0.99756	0.99754	0.99752	0.99749	0.99747	0.99744	0.99742	0.99740	0.99737	0.99735
24	0.99732	0.99730	0.99727	0.99725	0.99722	0.99720	0.99717	0.99715	0.99712	0.99710
25	0.99707	0.99704	0.99702	0.99699	0.99697	0.99694	0.99691	0.99689	0.99686	0.99684
26	0.99681	0.99678	0.99676	0.99673	0.99670	0.99668	0.99665	0.99662	0.99659	0.99657
27	0.99654	0.99651	0.99648	0.99646	0.99643	0.99640	0.99637	0.99634	0.99632	0.99629
28	0.99626	0.99623	0.99620	0.99617	0.99614	0.99612	0.99609	0.99606	0.99603	0.99600
29	0.99597	0.99594	0.99591	0.99588	0.99585	0.99582	0.99579	0.99576	0.99573	0.99570
30	0.99567	0.99564	0.99561	0.99558	0.99555	0.99552	0.99549	0.99546	0.99543	0.99540

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผลการรับรองสารมาตรฐาน Standard Reference Material 2709

San Joaquin Soil ของ NIST (ธาตุ สกกุลวรกิจ, 2545)

Element	mass %	Element	µg/g
Aluminum	7.50 ± 0.06	Antimony	7.9 ± 0.6
Calcium	1.89 ± 0.05	Arsenic	17.7 ± 0.8
Iron	3.50 ± 0.11	Barium	968 ± 40
Magnesium	1.51 ± 0.05	Cadmium	0.38 ± 0.01
Phosphorus	0.062 ± 0.005	Chromium	130 ± 4
Potassium	2.03 ± 0.06	Cobalt	13.4 ± 0.7
Silicon	29.66 ± 0.23	Copper	34.6 ± 0.7
Sodium	1.16 ± 0.03	Lead	18.9 ± 0.5
Sulfur	0.089 ± 0.002	Manganese	538 ± 17
Titanium	0.342 ± 0.024	Mercury	1.40 ± 0.08
Carbon	1.2	Nickel	88 ± 5
		Selenium	1.57 ± 0.08
		Silver	0.41 ± 0.03
		Strontium	231 ± 2
		Thallium	0.74 ± 0.05
		Vanadium	112 ± 5
		Zinc	106 ± 3
		Cerium	42
		Cesium	5.3
		Dysprosium	3.5
		Europium	0.54
		Iodine	5
		Lanthanum	23
		Molybdenum	2.0
		Neodymium	96
		Rubidium	96
		Samarium	3.8
		Scandium	12
		Thorium	11
		Tungsten	2
		Uranium	3
		Ytterbium	1.6
		Yttrium	18
		Zirconium	160

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวชิรบุญ ตรงศีลสัตย์ เกิดวันที่ 5 กันยายน พ.ศ.2523 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ จบการศึกษา
ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรม
มหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี
การศึกษา 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย